

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

3
МАЙ – ИЮНЬ
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

Анищенко В. А., Иванов В. В. Определение допустимых систематических перегрузок распределительных масляных трансформаторов	5
Петруша Ю. С. Риски потери управляемости при либерализации электроэнергетической отрасли	16
Старжинский А. Л. Определение надежности схем электроснабжения собственных нужд атомной электрической станции	24
Баро Бандиа. О комплексной записи полной мощности при расчете электрических систем	31

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Романюк В. Н., Муслина Д. Б. Эксергия текстильных материалов	46
Осипов С. Н. О стохастической оценке результатов волнового просвечивания твердых материалов при малом количестве измерений	60
Кунтыш В. Б., Сухоцкий А. Б., Яцевич А. В. Тепловая эффективность вихревой интенсификации теплоотдачи газового потока при продольном и поперечном обтекании круглотрубных поверхностей (Часть 1)	68
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 1)	76

Кравцов М. В. , Кравцов А. М. Общее уравнение закона гидравлического сопротивления при стесненном падении одиночного шара и движении жидкости в зернистых слоях	85
--	----

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 3.06.2015. 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

3
MAY – JUNE
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

Anishchenko V. A., Ivanov V. V. Ascertainment of Admissible Systematic Overloads in the Distributive Oil-Transformers	5
Petrusha Yu. S. Risks of Losing Controllability While Liberalizing the Electric Power Industry	16
Starzhinskij A. L. Ascertainment of Electric-Supply Schemes Reliability for the Atomic Power Plant Auxiliaries	24
Baro Bandia. On the Complex Formula of the Apparent Power in Calculations of the Electrical Systems	31

HEAT POWER ENGINEERING

Romaniuk V. N., Muslina D. B. Exergy of Textile Materials	46
Osipov S. N. On Stochastic Estimation of the Results of Undulatory Transillumination of Solid Materials with a Paucity of Measurements	60
Kuntysh 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 1)	68
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 1)	76

HYDRAULIC POWER ENGINEERING

- Krautso M. V.**, **Krautso A. M.** General Equation of the Hydraulic Friction Law
for Hindered Falling of an Individual Ball and Fluid Motion in Granular Layers 85

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 3.06.2015. 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 621.314

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМЫХ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПЕРЕГРУЗОК РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Докт. техн. наук, проф. АНИЩЕНКО В. А., асп. ИВАНОВ В. В.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: Ivanov_VV@minskenergo.by

Мощность силовых распределительных масляных трансформаторов выбирается исходя из экономической целесообразности режима их работы и надежности электроснабжения приемников электроэнергии при условии, что нагрузка трансформаторов не должна приводить к сокращению их нормального срока службы. Чрезмерно большие и длительные перегрузки существенно снижают надежность и соответственно срок службы трансформаторов из-за повышенного износа изоляции обмоток в результате перегрева. Неучет предыстории нагрузки и возможных изменений возникшей перегрузки в процессе ее дальнейшего развития может привести к большим погрешностям определяемой допустимой длительности перегрузки и как следствие к недопустимому перегреву изоляции обмоток или неполному использованию потенциальной перегрузочной способности трансформаторов, что ограничит возможность полного удовлетворения запросов потребителей электроэнергии. Именно поэтому действующий ГОСТ 14209–97 настоятельно рекомендует потребителям делать свои собственные расчеты допустимых нагрузок на основе реальных графиков нагрузки.

Разработана методика определения допустимой продолжительности систематической неаварийной перегрузки распределительного масляного трансформатора, учитывающая изменения кратности перегрузки на интервале времени ее существования и соответственно изменения теплового состояния трансформатора. Применение этой методики позволит повысить точность определения допустимой продолжительности систематических неаварийных перегрузок и, в конечном итоге, надежность работы трансформатора и системы электроснабжения в целом. Реализация методики предполагается посредством мониторинга нагрузки трансформатора как одной из задач автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии.

Ключевые слова: масляный трансформатор, продолжительность перегрузки, потребитель электроэнергии, график электропотребления.

Ил. 5. Табл. 5. Библиогр.: 11 назв.

ASCERTAINMENT OF ADMISSIBLE SYSTEMATIC OVERLOADS IN THE DISTRIBUTIVE OIL-TRANSFORMERS

ANISHCHENKO V. A., IVANOV V. V.

Belarusian National Technical University

The capacity of power-distributive oil-transformers is selected on the basis of their operational mode cost-effectiveness and power-supply reliability of the electrical recipients on condition that the transformers duty should not lead to reduction of their normal life-in-service.

Unconscionable and protracted overloads intrinsically decrease reliability and respectively service life of the transformers owing to increased wear of the winding insulation because of the excessive heat.

The unaccounted previous loading history and possible changes of the risen overload in the course of its further development can lead to poor accuracy in the admissible overload-time estimation. Therefore, that may lead to intolerable excessive heat in the winding insulation or underutilization of the potential overload capacity of the transformers. Which limits the potentiality of complete demand satisfaction of the electrical consumers. This is exactly why the acting GOST 14209–97 strongly recommends the consumers to make their own calculations of the load-carrying capacity based on the real load curves.

The authors present a method for ascertainment of the admissible duration of the systematic non-emergency overload of a distributive oil-transformer. The ascertainment method accounts for the overload repetition-factor alteration on the time-interval of its occurrence and respectively the variation in the transformer thermal state. The employment of this method will allow improving accuracy in ascertainment of the admissible duration of the systematic non-emergency overloads and eventually the reliability of the transformer operation and the power-supply system in its entirety. The method realization is intended by means of the transformer-load monitoring as one of the tasks of the electric-energy automated control and accounting system.

Keywords: oil-immersed transformer, overload duration, electric consumer, load curve.

Fig. 5. Tab. 5. Ref.: 11 titles.

Введение. Мощность силовых распределительных масляных трансформаторов выбирается исходя из экономической целесообразности режима их работы и надежности электроснабжения приемников электроэнергии при условии, что нагрузка трансформаторов не должна приводить к сокращению их нормального срока службы. Чрезмерно большие и длительные перегрузки существенно снижают надежность и соответственно срок службы трансформаторов из-за повышенного износа изоляции обмоток в результате перегрева. В то же время недоиспользование потенциальной перегрузочной способности трансформаторов может привести к необоснованному преждевременному отключению потребителей электроэнергии и как следствие экономическому ущербу.

При проектировании рекомендуется выбирать трансформаторы с таким расчетом, что их можно будет перегружать на 40 % в течение пяти суток с продолжительностью перегрузки в каждые сутки не более 6 ч. Эта норма носит осредненный характер и не учитывает разные типы трансформаторов, системы их охлаждения и климатические условия. В процессе эксплуатации при росте с течением времени нагрузок потребителей электрической энергии и достаточно высоких температурах охлаждающей среды возникает необходимость обоснованно перегружать трансформаторы с учетом конкретных условий работы.

Межгосударственный стандарт ГОСТ 14209–97 [1], представляющий собой полный аутентичный текст МЭК 354 (1991), устанавливает технически обоснованные режимы нагрузки трансформаторов с точки зрения допустимых температур их нагрева и термического износа. В частности, для распределительных трансформаторов мощностью до 2500 кВ·А включительно и напряжением 35 кВ и менее с естественной циркуляцией воздуха и масла (система охлаждения ONAN), соответствующих ГОСТ 3484.2–88 [2], стандарт [1] приводит графики и таблицы для определения допустимой продолжительности режимов систематических неаварийных нагрузок для заданной температуры охлаждающей среды.

Следует заметить, что в более ранних редакциях [1, 2] вместо понятия «систематические нагрузки» использовалось определение «систематические перегрузки», которое подчеркивало, что перегрузки по току на каком-то интервале времени внутри суточного цикла имеют место, но являются допустимыми, поскольку компенсируются за счет понижения температуры охлаждающей среды или тока нагрузки в течение остальной части цикла. При этом, как и при постоянной номинальной нагрузке, происходит естественное нормальное сокращение службы трансформаторов в связи с эквивалентностью термического износа изоляции в обоих случаях. Различие старых и новой редакций носит терминологический характер. Представляется более точным определение «систематические неаварийные перегрузки», которое используется в данной статье.

Нормальный продолжительный режим нагрузки. Изоляция обмоток трансформаторов подвергается термохимическому износу. Этот процесс является кумулятивным и приводит к недопустимому состоянию изоляции. Скорость износа изоляции удваивается при каждом возрастании температуры приблизительно на 6 °С. Она определяется температурой наиболее нагретой точки изоляции и соприкасающихся с ней металлических частей. Для трансформаторов, удовлетворяющих требованиям ГОСТ 11677–85 [3], допустимое значение температуры наиболее нагретой точки, гарантирующее нормальный износ трансформаторов, составляет $\theta_{\text{доп}} = 98\text{ °С}$, что соответствует работе трансформатора при температуре охлаждающей среды $\theta_{\text{ос}} = 20\text{ °С}$ и превышению температуры наиболее нагретой точки $\theta_{\text{ннт}} = 78\text{ °С}$.

При достаточно равномерном графике нагрузки в течение суток или на более продолжительном интервале времени допустимая кратность нагрузки существенно зависит от температуры охлаждающей среды. Допустимая кратность нагрузки в этом нормальном продолжительном режиме представляет собой отношение допустимого тока трансформатора $I_{\text{доп}}$ к его номинальному значению $I_{\text{ном}}$ при температуре охлаждающей среды $\theta_{\text{ос}} = 20\text{ °С}$

$$K_{\text{доп}} = \frac{I_{\text{доп}}}{I_{\text{ном}}}. \quad (1)$$

Допустимое превышение температуры наиболее нагретой точки определяется как разность температуры наиболее нагретой точки обмотки изоляции $\theta_{\text{из}}$ и температуры охлаждающей среды

$$\tau_{\text{доп}} = \theta_{\text{из}} - \theta_{\text{ос}}. \quad (2)$$

Значения допустимых кратностей нагрузки в нормальном продолжительном режиме при равномерном графике и разных температурах приведены в табл. 1.

Таблица 1

Температура охлаждающей среды $\theta_{\text{ос}},\text{ °С}$	–25	–20	–10	0	10	20	30	40
Допустимое превышение температуры $\tau_{\text{доп}},\text{ °С}$	123	118	108	98	88	78	68	58
Допустимая кратность нагрузки $K_{\text{доп}},\text{ о. е.}$	1,37	1,33	1,25	1,17	1,09	1,00	0,91	0,81

Нормальные режимы систематических перегрузок. Согласно [1], нормальные режимы систематических перегрузок представляют собой

циклические неаварийные режимы с нормальным сокращением срока службы, эквивалентным его сокращению в процессе продолжительной работы с номинальной нагрузкой при температуре охлаждающей среды $\theta_{oc} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом не должна превышать допустимая температура наиболее нагретой точки, но допускается превышение допустимых при нормальном продолжительном режиме кратностей нагрузки, приведенных в табл. 1. Интервалы времени, в течение которых трансформатор работает с повышенной скоростью относительного износа изоляции, компенсируются интервалами с пониженной скоростью износа.

Для распределительных трансформаторов с системой охлаждения ONAN стандартом [1] определены допустимые продолжительности систематических неаварийных перегрузок в зависимости от кратности начальной нагрузки K_1 , предшествующей моменту возникновения перегрузки, и кратности перегрузки K_2 при разных значениях температуры охлаждающей среды в диапазоне от -25 до $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Эти допустимые перегрузки получены с невысокой точностью из-за принятых при их определении допущений, основными из которых являются:

- температура охлаждающей среды полагается неизменной на протяжении всего суточного графика нагрузки;
- суточное изменение нагрузки представлено упрощенным двухступенчатым прямоугольным графиком.

В указанном стандарте рассматриваются и более сложные типы двухступенчатых графиков: с одним максимумом нагрузки, с двумя максимумами различной продолжительности, с последовательными максимумами. Они могут использоваться для выбора номинальной мощности трансформаторов на стадии проектирования систем электроснабжения. Однако при эксплуатации нагрузка может непрерывно изменяться в широких пределах, и ее фактический график будет существенно отличаться от стандартного, что снижает точность определяемой допустимой продолжительности перегрузки.

Оценка точности стандартных допустимых систематических перегрузок. Произведем примерную оценку точности определяемой стандартной допустимой продолжительности систематических перегрузок на примерах режимов, представленных на рис. 1 и в табл. 2, 3.

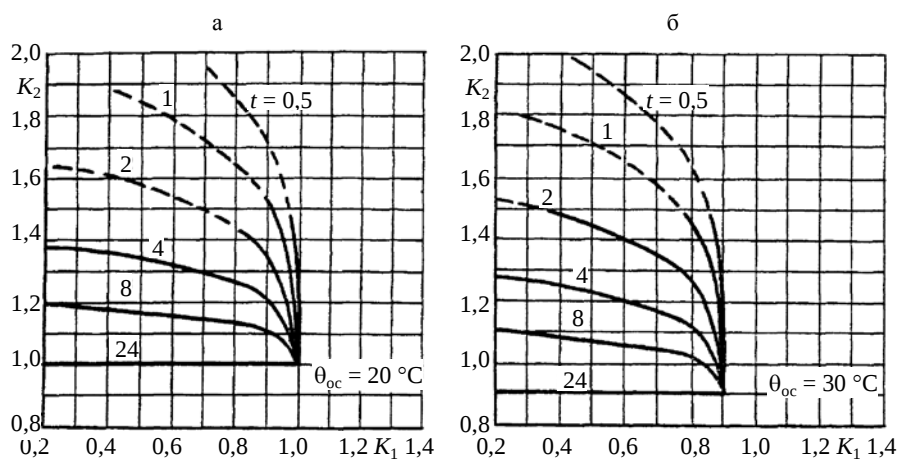


Рис. 1. Распределительные трансформаторы с охлаждением ONAN.
Допустимые режимы нагрузки с нормальным сокращением срока службы при:
а – $\theta_{oc} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; б – $30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблица 2

Режим нагрузки при $\theta_{oc} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

$t, \text{ ч}$	K_1					
	0,25	0,50	0,70	0,80	0,90	1,00
0,5	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,00
1,0	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,00
2,0	1,50	1,50	1,49	1,43	1,34	1,00
4,0	1,37	1,34	1,29	1,25	1,19	1,00
8,0	1,18	1,17	1,15	1,13	1,10	1,00
24,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Таблица 3

Режим нагрузки при $\theta_{oc} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

$t, \text{ ч}$	K_1				
	0,25	0,50	0,70	0,80	0,90
0,5	1,50	1,50	1,50	1,50	1,12
1,0	1,50	1,50	1,50	1,45	1,03
2,0	1,50	1,35	1,35	1,26	0,97
4,0	1,27	1,23	1,17	1,10	0,94
8,0	1,09	1,07	1,04	1,01	0,92
24,0	0,91	0,91	0,91	0,51	0,91

Предположим, что кратность начальной нагрузки $K_1 = 0,6$ и перегрузки $K_2 = 1,4$. При температуре охлаждающей среды $\theta_{oc} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ им соответствует допустимая продолжительность перегрузки $t_n = 3,6\text{ ч}$, а при резком повышении температуры сразу после наступившей перегрузки до $\theta_{oc} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ получаем $t_n = 2,0\text{ ч}$. При кратностях нагрузки и перегрузки $K_1 = 0,8$ и $K_2 = 1,4$ имеем $t_n = 2,8\text{ ч}$ при $\theta_{oc} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_n = 1,2\text{ ч}$ при $\theta_{oc} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, неучет изменения температуры охлаждающей среды может значительно, до двух и более раз, изменить допустимую продолжительность перегрузки.

Не в меньшей степени на точность определения допустимой перегрузки может повлиять неучет фактического теплового состояния трансформаторов в момент времени t_1 , предшествующий началу перегрузки. Обратимся к эквивалентному суточному графику нагрузки (рис. 2), на основе которого стандарт [1] определяет допустимые значения t_n .

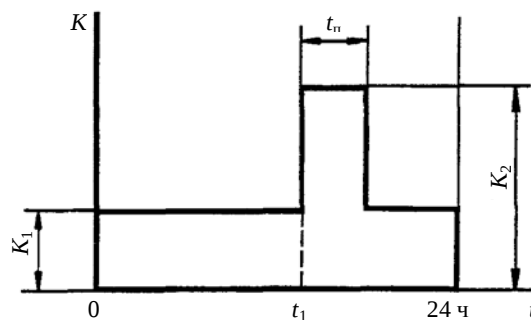


Рис. 2. Эквивалентный двухступенчатый график нагрузки

Кратность K_1 в этом случае полагается постоянной на всем интервале $(0, t_1)$, но в действительности она может существенно изменяться и ее зна-

чение в момент времени t_1 не будет соответствовать температуре наиболее нагретой точки. Одному и тому же значению K_2 могут соответствовать разные значения температуры из-за инерционности теплового процесса. Неучет предыстории нагрузки на интервале времени, предшествующем перегрузке, снижает точность определения t_n . Например, при кратности нагрузок $K_1 = 0,9$ и $K_2 = 1,3$ при $\theta_{oc} = 20$ °C имеем $t_n = 2,5$ ч. Если температура наиболее нагретой точки в момент времени t_1 соответствует $K_1 = 0,7$, то должно быть $t_n = 4,0$ ч.

Таким образом, неучет предыстории нагрузки и возможных изменений возникшей перегрузки в процессе ее дальнейшего развития может привести к большим погрешностям определяемой допустимой длительности перегрузки и, как следствие, к недопустимому перегреву изоляции обмоток или неполному использованию потенциальной перегрузочной способности трансформаторов, что ограничит возможность полного удовлетворения запросов потребителей электроэнергии. Именно поэтому стандарт [1] настоятельно рекомендует потребителям делать свои собственные расчеты допустимых нагрузок на основе реальных графиков нагрузки.

Математическая модель теплового режима трансформатора. Рассмотрим модель, описывающую изменения температуры трансформатора в неустановившемся режиме работы. С достаточной для практических целей точностью при расчетах норм нагрузочной способности трансформатора можно использовать классическое уравнение теплового баланса в «чистом виде» [4–6]

$$\Delta P dt = A dt - D d\tau, \quad (3)$$

где ΔP – мощность активных потерь при прохождении электрического тока, Вт; A – коэффициент теплоотдачи, Вт/°C; D – теплоемкость трансформатора, Вт·с/°C; τ – превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки изоляции $\theta_{из}$ над температурой охлаждающей среды θ_{oc} ,

$$\tau = \theta_{из} - \theta_{oc}, \quad (4)$$

$d\tau$ – прирост превышения температуры, °C; dt – шаг времени, с.

Из уравнения (3) можно определить установившееся значение превышения температуры наиболее нагретой точки над температурой окружающей среды

$$\tau_{уст} = \frac{\Delta P}{A} = \tau + T \frac{d\tau}{dt}, \quad (5)$$

где $T = D/A$ – постоянная времени нагрева трансформатора, с.

Поскольку постоянная времени нагрева обмотки невелика (5–10 с), постоянная времени нагрева трансформатора обусловлена в основном нагревом масла и для распределительных трансформаторов $T \approx 3$ ч.

Из (5) получаем зависимость превышения температуры наиболее нагретой точки в неустановившемся режиме от времени

$$\tau = \tau_{уст} - (\tau_{уст} - \tau_n) \exp\left(-\frac{t}{T}\right), \quad (6)$$

где τ_n – начальное превышение температуры наиболее нагретой точки.

Из (6) получаем формулу для расчета допустимой продолжительности систематической неаварийной перегрузки трансформатора, работающего с нормальным сокращением срока службы:

$$t_{\text{п}} = -T \ln \frac{\tau_{\text{уст}} - \tau_{\text{доп}}}{\tau_{\text{уст}} - \tau_{\text{н}}}, \quad (7)$$

где $\tau_{\text{доп}}$ – допустимое превышение температуры наиболее нагретой точки.

Переходной неустановившийся процесс нагрева показан на рис. 3.

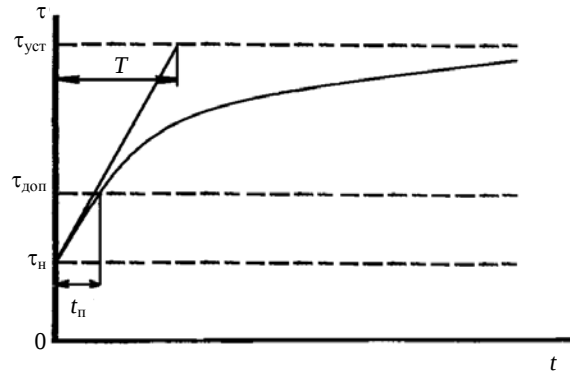


Рис. 3. Превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора в зависимости от времени

Методика определения допустимой продолжительности систематической неаварийной перегрузки с учетом реального графика нагрузки. Согласно рекомендации стандарта [1], основным критерием допустимости перегрузки трансформатора является температура наиболее нагретой точки обмотки изоляции. Она ограничивается для распределительных трансформаторов значением 140 °С, которое соответствует началу ускоренного старения изоляции. Непосредственное измерение температуры наиболее нагретой точки затруднительно из-за высокого напряжения, и обычно ее вычисляют по методике, основанной на термохимическом законе Аррениуса и упрощенном соотношении Монтсингера [7]. Но даже если примириться со сложностью измерения температуры и отключать трансформатор на основе показания ее датчика, не получается прогнозировать допустимую продолжительность перегрузки из уравнения (7), так как неизвестно ожидаемое установившееся значение превышения температуры, соответствующее возникшей перегрузке.

Следует также учитывать зависимость постоянной времени нагрева от перегрузки, поскольку с ростом температуры увеличивается омическое сопротивление обмоток трансформатора. При небольших перегрузках порядка 10–25 % этим фактором можно пренебречь. Однако при больших перегрузках необходимо учитывать увеличение омического сопротивления, поскольку оно ведет к росту тепловой интенсивности электротермического процесса и уменьшает постоянную времени нагрева [4].

Поэтому не случайно действующий стандарт [1] регламентирует допустимую продолжительность перегрузки в зависимости не от температуры, а от первоначальной кратности нагрузки K_1 и перегрузки K_2 с учетом тем-

пературы охлаждающей среды (табл. 2, 3 и рис. 1). Связь между кратностью перегрузки и обусловленной ею кратностью превышения температуры изоляции обмоток над температурой охлаждающей среды отражает инерционное звено первого порядка с передаточной функцией

$$W(P) = \frac{k}{TP + 1}, \quad (8)$$

где входным сигналом является кратность перегрузки, выходным – кратность превышения температуры наиболее нагретой точки; $P = d/dt$ – оператор дифференцирования; k – коэффициент пропорциональности.

Если в процессе перегрузки ее кратность изменяется, то ее можно представить рядом накладываются ступенек кратности, сдвинутых относительно начала перегрузки на интервалы временной дискретизации процесса. Текущее превышение температуры в этом случае будет суммой переходных функций (6), сдвинутых на те же интервалы времени и умноженных на величины ступенек кратностей превышения температуры. При этом должны быть учтены начальные условия, различные в начале каждого интервала. В относительных единицах превышение температуры эквивалентно осредненной с постоянной времени T перегрузке, которая может непрерывно изменяться. Осреднение удобно производить методом экспоненциального сглаживания [8–11]

$$\overline{K}_1(t) = \alpha K_2(t) + [1 - \alpha] \overline{K}_1(t - h), \quad (9)$$

где $\overline{K}_1(t)$ – осредненная кратность нагрузки в момент времени t ; $\overline{K}_1(t - h)$ – осредненная кратность нагрузки в предыдущий момент времени $t - h$; h – интервал времени дискретизации процесса.

Параметр сглаживания α определяется при $T \gg h$ как

$$\alpha = 1 - \exp\left(-\frac{h}{T}\right). \quad (10)$$

Используя рекурсивное соотношение (9), можно непрерывно отслеживать осредненную кратность перегрузки и таким образом косвенно контролировать тепловое состояние трансформатора. Фактическая кратность перегрузки в текущий момент времени $K_2(t)$ эквивалентна соответствующему ей ожидаемому в момент времени $t + 3T$ установившемуся превышению температуры $\tau_{уст}$. Осредненная кратность перегрузки $\overline{K}_1(t)$ эквивалентна первоначальному превышению температуры τ_n в начале каждого интервала дискретизации [11].

Исходя из переходной функции (6), выводим идентичную (7) формулу для определения допустимой продолжительности систематической неаварийной перегрузки

$$t_n = -T \ln \frac{K_2(t) - K_3}{K_2(t) - \overline{K}_1(t)}, \quad (11)$$

где K_3 – кратность перегрузки, соответствующей допустимому превышению температуры наиболее нагретой точки.

Значение K_3 рассчитывается исходя из регламентируемых стандартом [1] допустимых значений кратностей K_1 и K_2 (индекс времени здесь опущен)

$$K_3 = K_2 - (K_2 - K_1)e^{-\frac{t_n}{T}}. \quad (12)$$

Результаты расчетов кратности K_3 по формуле (12) при разных температурах окружающей среды представлены в табл. 4, 5. Значения K_1 и K_2 взяты из табл. 2, 3.

Таблица 4

Кратность допустимой перегрузки K_3 при $\theta_{oc} = 20^\circ\text{C}$

K_1 , о. е.	0,900	0,800	0,700	0,500	0,250	0,900	0,800	0,700	0,500	0,250	0,800	0,700	0,500
K_2 , о. е.	1,100	1,130	1,150	1,170	1,180	1,190	1,250	1,290	1,340	1,370	1,40	1,490	1,500
K_3 , о. е.	1,086	1,107	1,119	1,122	1,115	1,113	1,13	1,133	1,116	1,073	1,122	1,085	1,090

Таблица 5

Кратность допустимой перегрузки K_3 при $\theta_{oc} = 30^\circ\text{C}$

K_1 , о. е.	0,900	0,900	0,900	0,800	0,800	0,900	0,700	0,500	0,250	0,700	0,500	0,800	0,250	0,700	0,800	0,700
K_2 , о. е.	0,940	0,920	0,970	1,000	1,100	1,030	1,040	1,070	1,090	1,170	1,230	1,260	1,270	1,350	1,450	1,500
K_3 , о. е.	0,929	0,915	0,981	0,886	0,91	0,984	1,016	1,03	1,032	1,045	1,056	1,024	0,999	1,017	0,984	0,926

Среднее значение кратности допустимой перегрузки составило $K_{3cp} = 1,1086$ при $\theta_{oc} = 20^\circ\text{C}$ и $K_{3cp} = 0,9843$ при $\theta_{oc} = 30^\circ\text{C}$. Осреднение значений кратности K_3 позволяет упростить алгоритм. Анализ показал практически удовлетворительную точность определения допустимой продолжительности перегрузки при подстановке в расчетную формулу (11) среднего значения кратности K_{3cp} .

Апробация методики определения допустимой продолжительности систематической неаварийной перегрузки с учетом реального графика нагрузки. Апробация предложенной выше методики нормирования допустимой переменной перегрузки была произведена посредством вычислительного эксперимента. Зависимости от времени фактической (неосредненной) кратности перегрузки $K_2(t)$ и рассчитанной по формуле (9) с учетом (10) осредненной кратности $\overline{K_1}(t)$ показаны на рис. 4. Были приняты: первоначальная кратность нагрузки $K_1(0) = 0,25$; кратность возникшей в этот же момент времени перегрузки $K_2(0) = 1,18$; температура охлаждающей среды $\theta_{oc} = 20^\circ\text{C}$; шаг временной дискретизации $h = 3$ мин. Последующие изменения перегрузки составили $K_2(2) = 1,50$ и $K_2(3) = 1,25$.

Изменения допустимой продолжительности перегрузки, приведенной на рис. 4, показаны на рис. 5.

Кривая 1 соответствует случаю, когда не учитываются последующие изменения возникшей в момент времени $t = 0$ перегрузки, т. е. $K_2(t) = \text{const}$, и теплового состояния трансформатора в процессе перегрузки, т. е. $\overline{K_1}(t) = \text{const}$.

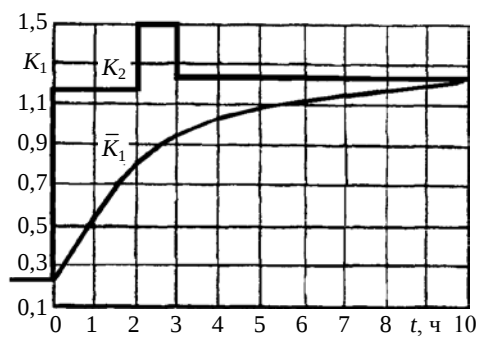


Рис. 4. Фактическая и осредненная перегрузки

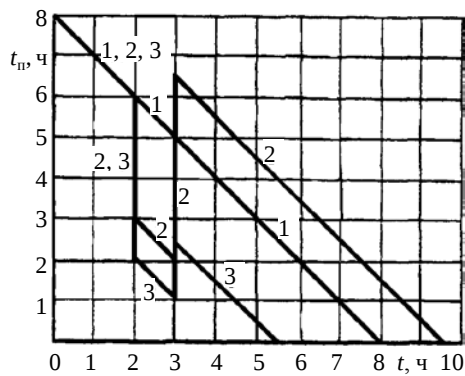


Рис. 5. Допустимая продолжительность перегрузки

Кривая 2 соответствует случаю, когда учитываются изменения перегрузки ($K_2(t) = \text{var}$), но не учитываются изменения теплового состояния трансформатора ($\bar{K}_1(t) = \text{const}$).

Кривая 3 соответствует случаю, когда учитываются изменения как фактической перегрузки ($K_2(t) = \text{var}$), так и характеризующей тепловое состояние трансформатора осредненной перегрузки ($\bar{K}_1(t) = \text{var}$).

Допустимую продолжительность перегрузки во всех трех рассмотренных случаях рассчитывали по формуле (11), справедливой как для нормируемых стандартом [1] неизменных в процессе наступившей перегрузки значений $K_2(t)$, так и для переменных значений $K_2(t)$, обусловленных изменением участка графика нагрузки, на котором происходит перегрузка.

Анализ результатов расчета значений t_n для $\theta_{oc} = 20^\circ\text{C}$, приведенных на рис. 5, как и для других значений температуры охлаждающей среды в диапазоне от -25°C до 40°C , показывает, что учет переменного характера возникшей перегрузки повышает точность определения ее допустимой продолжительности в несколько раз.

ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ показал, что неучет реального суточного графика нагрузки подстанции и переменного характера перегрузки силового распределительного трансформатора может привести к большим ошибкам в определении допустимой продолжительности перегрузки, что снизит надежность и срок службы или приведет к недоотпуску электроэнергии потребителям из-за необоснованного преждевременного отключения части электроприемников.

2. Разработана методика определения допустимой продолжительности систематической неаварийной перегрузки распределительного масляного трансформатора, учитывающая изменения кратности перегрузки на интервале времени ее существования и соответственно изменения теплового состояния трансформатора. Применение этой методики позволит повысить точность определения допустимой продолжительности систематических неаварийных перегрузок и, в конечном итоге, надежность работы трансформатора и системы электроснабжения в целом. Реализация методики предполагается посредством мониторинга нагрузки трансформатора как одной из задач автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки: ГОСТ 14209–85. – Взамен ГОСТ 14209–69; введ. 01.07.85. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 30 с.
2. Трансформаторы силовые. Методы испытаний и измерений: сборник. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 180 с.
3. Трансформаторы силовые. Общие технические условия: ГОСТ 11677–85. – Взамен ГОСТ 11677–75; введ. 01.07.1986. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 58 с.
4. Шницер, Л. М. Основы теории и нагрузочная способность трансформаторов / Л. М. Шницер. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 232 с.
5. Боднар, В. В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов / В. В. Боднар. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 177 с.
6. Чунихин, А. А. Электрические аппараты / А. А. Чунихин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
7. Киш, З. Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов / З. Л. Киш. – М.: Энергия, 1980. – 208 с.
8. Анищенко, В. А. Контроль допустимых кратковременных аварийных перегрузок силовых трансформаторов / В. А. Анищенко, В. А. Адамцевич // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2010. – № 3 – С. 23–33.
9. Анищенко, В. А. Допустимые переменные систематические перегрузки силовых трансформаторов / В. А. Анищенко, В. В. Иванов // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Десятой Междунар. науч.-техн. конф.: в 4 т. – Минск: БНТУ, 2012. – Т. 1. – С. 4–6.
10. Анищенко, В. А. Определение допустимых систематических нормальных нагрузок масляных трансформаторов / В. А. Анищенко, В. В. Иванов // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Минск: БГАТУ, 2013. – С. 36–37.
11. Бендат, Дж. Измерение и анализ случайных процессов / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1974. – 404 с.

REFERENCES

1. State Standard 14209–85. Oil-Immersed General-Purpose Power Transformers. Permissible Loads. Moscow, Publisher Standards, 1985. 30 p. (in Russian).
2. Power Transformers. Testing and Measurement Methods. Collection. Moscow, Publisher Standards, 1989. 180 p. (in Russian).
3. State Standard 11677–85. Power Transformers. General Technical Conditions. Moscow, Publisher Standards, 1990. 58 p. (in Russian).
4. Shnitsers, L. M. (1959) *Theoretical Framework and Loading Capacity of the Transformers*. Moscow, Gosenergoizdat. 232 p. (in Russian).
5. Bodnar, V. V. (1983) *Loading Capacity of the Oil-Immersed Power Transformers*. Moscow, Energoatomizdat. 177 p. (in Russian).
6. Chunikhin, A. A. (1988) *Electric Apparatuses*. Moscow, Energoatomizdat. 720 p. (in Russian).
7. Kish, Z. L. (1980) *Heating and Cooling of the Transformers*. Moscow, Energia. 208 p. (in Russian).
8. Anishchenko, V. A., & Adamtsevich, V. A. (2010) Control of Admissible Short-Run Emergent Overloads in the Power Transformers. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG – Energetika* [Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Energetika], 3, 23–33 (in Russian).
9. Anishchenko, V. A., & Ivanov, V. V. (2012) Admissible Variable Systematic Overloads in the Power Transformers. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike. Materialy Desiatoi mezhdunarodnoi Nauch.-Tekhn. Konf. T. 1* [Science to Education, Industry, Economics. Proceedings of 10th International Science and Technical Conference. Vol. 1]. Minsk: BNTU, 4–6 (in Russian).
10. Anishchenko, V. A., & Ivanov, V. V. (2013) Ascertainment of Admissible Systematic Normal Loads of the Oil-Immersed Power Transformers. *Energoberezhenie – Vazhneishee Usloviye Innovatsionnogo Razvitiia APK: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Power Saving – the Controlling Factor of the Agroindustrial Complex Innovative Development: Proceedings of International Scientific and Technical Conference]. Minsk: BSATU [Belarusian State Agrarian Technical University], 36–37 (in Russian).
11. Bendat, J. S., & Piersol A. G. (1966) *Measurement and Analysis of Random Data*. John Wiley & Sons, Inc, New-York. (Russ. ed.: Bendat, J. & Piersol A. (1974) *Izmerenie i Analiz Sluchainykh Protseessov*. Moscow, Mir. 404 p.).

Представлена кафедрой электроснабжения

Поступила 04.12.2014

РИСКИ ПОТЕРИ УПРАВЛЯЕМОСТИ ПРИ ЛИБЕРАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Канд. техн. наук ПЕТРУША Ю. С.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: ur.petrusha@gmail.com

Анализируется управляемость как характеристика надежности системы управления электроэнергетической системой. Используются понятия восприимчивости объекта (среды) к управляющим воздействиям, адекватности системы управления, среды безопасного функционирования. Отмечается необходимость учета ограничений управляемости технологического и организационного характера. При либерализации энергетики происходит смена основополагающего критерия управления «надежность функционирования отрасли» на критерий «получение прибыли», что требует полной трансформации методологии управления.

Конфликт между получением коммерческой выгоды и издержками обеспечения надежности приводит к потере управляемости во всех звеньях управления и вероятным катастрофическим последствиям. Итоги приватизации энергетики в Российской Федерации подтверждают опасения плохой приживаемости либеральных идей на постсоветском пространстве, а результаты деградации среды безопасного функционирования демонстрируют общность спусковых механизмов возникновения аварий на Чернобыльской АЭС, АЭС «Фукусима» и Саяно-Шушенской ГЭС, когда обеспечение надежности стратегических объектов выходит за пределы компетенции электроэнергетической отрасли.

Актуальной задачей функционирования и развития белорусской энергетики является совмещение технического переоснащения (совершенствование оперативно-диспетчерского управления) и организационной модернизации системы управления в целом с поэтапным контролируемым переходом к рыночным механизмам функционирования. При этом сохранение государственной монополии на режимное обеспечение работы электроэнергетической системы не должно исключить привлекательность отрасли для внешнего инвестирования и регулируется оптимальными степенью и глубиной участия государства в управлении электроэнергетикой. Различие моделей приватизации и пройденных этапов определяет вхождение Беларуси в общий электроэнергетический рынок стран Единого экономического пространства с ограничениями на уровне трансграничной торговли и сохранением структуры внутренних рынков государств-членов.

Ключевые слова: управляемость, обеспечение надежности, среда безопасного функционирования, приватизация энергетической отрасли, риски потери управляемости.

Библиогр.: 10 назв.

RISKS OF LOSING CONTROLLABILITY WHILE LIBERALIZING THE ELECTRIC POWER INDUSTRY

PETRUSHA Yu. S.

Belarusian National Technical University

The paper analyses controllability qua a reliability characteristic of the electric-power grid controlling system. The following notions are used: the object (environment) susceptibility towards the control stimuli, the controlling system adequacy, environment of the secure functioning. The author points to the necessity of accounting for the limitations of technological and organizational character. While liberalizing the electric-power industry, the backbone control-principle “the industry functioning reliability” is being replaced with the principle of “profit-making” that requires complete restatement of the control philosophy.

The conflict between commercial benefit gaining and the reliability assurance expenses leads to losing controllability in all the managerial links and to probable catastrophic consequences. The recapitulation of the Russian Federation power industry privatization substantiates concerns of the liberal ideas poor survivability in the ex-Soviet territories. The results of degradation of the secure-functioning environment demonstrate affinity of the mechanisms that triggered the Chernobyl NPP, Fukusima NPP, and Sayan-Shushenskya HPP disasters. Securing reliability of the strategic objects leaves the competence boundaries of the electric-power industry.

The topical issue of Belorussian electric-power industry functioning and developing is the combination of technical re-equipment (developing the operational dispatch management) and the control-system organizational modernizing in general with gradual and controllable transition to the market mechanisms of functioning. Herewith, preserving the state monopoly on regime provision for the operation of the electric-power system should not leave out the industry appeal for outside investment and is regulated by the optimal degree and intensity of the state participation in governing the electric-power supply industry. The distinction of privatization models and the stages that the countries of the Common Free Market Zone have passed determine Belarus entering the common electric-energy market with limitations at the level of transboundary trade and preservation of the member states internal-commerce structure.

Keywords: controllability, reliability assurance, secure functioning environment, power industry privatizing, risks of losing controllability.

Ref.: 10 titles.

Введение. Электроэнергетическая система (ЭЭС) в силу своих технологических особенностей (сложность и многообразие структуры, географическая протяженность, быстрота протекающих процессов, риск потери синхронизма, физическая связь со всеми объектами экономики и социального обеспечения) требует особых подходов при выборе и реализации идеологии и стратегии организационно-технического управления. Составляющие элементы при решении задачи построения устойчивой и адекватной системы управления – контроль управляемости отдельных процессов и объектов в целом, формирование необходимой среды функционирования. При этом управляемость как характеристика надежности процесса управления также является предметом управления с соответствующими критериями и методологией. Под средой функционирования, или просто средой, следует понимать категорию, более сложную и менее определенную в сравнении с системой кибернетического типа и подверженную существенному воздействию субъективных факторов, в том числе ошибочных решений и решений коммерчески или политически мотивированных. Выбор и формирование характеристик объекта в задачах управления отражают особенности объекта и задачи по его управлению и свойственную задачам структуру управляемости объекта.

Согласно основам теории управления [1], управление в самом широком смысле есть процесс поддержания функционирования системы в заданных условиях или перевод системы из одного состояния в другое. Практика управления свидетельствует о том, что не всегда «совокупность целенаправленных воздействий» приводит к желаемому результату. В некоторых случаях даже долгий поиск адекватных управляющих воздействий не только не дает заданного изменения, но даже не позволяет сохранить функциональность объекта управления. В этом случае приходится говорить о потере управляемости объектом или процессом.

К сожалению, анализ управляемости проводится в весьма ограниченной области задач управления, относящейся, как правило, к структурам микро-электронного класса систем управления. В организационном управлении (менеджменте) проблема «неуправляемости» вообще не рассматривается [2]. ЭЭС, включающая в себя сложнейшие технико-технологические и организационно-экономические процессы управления, требует поиска и выполнения условий сохранения и развития управляемости.

В общем виде управляемость можно определить [3]:

- восприимчивостью объекта (среды) к управляющим воздействиям;
- допустимым диапазоном (с учетом ограничений) технологических и организационных изменений режимов и структуры;
- адекватностью, устойчивостью и надежностью системы управления;
- координацией физико-технических и организационно-экономических приемов управления.

Потеря или необеспечение управляемости приводит к функциональному сбою предмета управления, разрушению объекта и среды его безопасного функционирования, колоссальным материальным потерям и трагическим последствиям.

Риски либерализации. При либерализации отрасли меняются идеология и используемые методы организационного управления. Происходит замена главного критерия управления «обеспечение надежного функционирования» на критерий «получение прибыли». При этом рассуждения об исключительной эффективности рыночных методов управления не вскрывают принципиального различия этих критериев и последствий их применения, а также исторических особенностей стран с плановой и либеральной экономикой.

Фактическая смена цели приводит к замене действующей системы управления и обеспечения управляемости, требует устранения государственной монополии и дезинтеграции процессов производства, передачи и распределения электроэнергии. Взамен предлагается огромное число посредников и участников [4] с сомнительными компетентностью, добросовестностью и мотивацией, призванных научить энергетиков «эффективно» работать.

Открытым остается вопрос спорных (с точки зрения решения общенациональных задач) результатов реализации либеральных идей и преобразований на постсоветском пространстве как в энергетике, так и в экономике в целом. Ответ на него дает анализ истории развития капитализма в Российской империи – процесс накопления существенных материальных ресурсов в этой стране всегда шел по двум противоречим направлениям:

- открытие своего дела как возможность реализации деловых качеств, стремления обрести свободу от вечного гнета государства и помещиков или просто вырваться из нищеты. Первоначальный капитал собирался поколениями, когда будущие бизнесмены отказывали себе в самом необходимом. Совесть и добродетельность были естественной идеологией ведения бизнеса;
- обогащение без создания прибавочного продукта, за счет казнокрадства, мздоимства, административного ресурса и «нецелевого» использования государственных средств, которое на много поколений опережало появление заводов и мануфактур.

Быстротечность революционных процессов перестройки и роспуска СССР в соответствии с главным законом революции (свершают безумцы, используют негодяи) открыла дорогу представителям второго направления, сформировавшим бизнес-среду «под себя», исключающую доступ к участию и возможность развития «хорошего хозяина». Отсюда вытекают вторая неучтенная особенность и причина неприживаемости либерализма – принципиальное различие необходимых методов реформирования отрасли в странах с рыночной и плановой или постплановой экономикой. Идеи, а главное, методы либерализации в постплановой экономике наталкиваются на «дориночный» менталитет подавляющей части населения, сохранение в управляющей элите традиций директивного управления, отсутствие навыков ведения честного бизнеса в смежных и обслуживающих отраслях, неадекватность правовой системы новым требованиям и стартовую беспомощность надзорных и правоохранительных структур.

Все это приводит к необходимости пересмотра идеологии обеспечения управляемости, исключающей вероятные экономические потери, а иногда и общую деградацию отрасли. Катастрофичный результат потери управляемости – снижение надежности и разрушение среды безопасности, являющейся естественной основой эффективно действующей электроэнергетики. Колоссальный потенциал физической энергии, циркулирующей в ЭЭС, представляет собой опасность не только разрушения энергетических объектов и угрозу для обслуживающего персонала, но и для населения региона расположения объекта. Формирование и сохранение среды безопасности начинаются с наличия исправных замков и блокировок в электроустановке, продолжаются организацией слаженной работы всех служб на энергетическом объекте (например, АЭС) и завершаются эффективностью политики, проводимой во всех областях государственного устройства.

Потеря управляемости и необеспечение надежности. Анализ многообразия аварийных инцидентов говорит о схожести спусковых механизмов начала и развития аварий в обычной электрощитовой и на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) – многократное нарушение регламентов технической эксплуатации плюс пресловутый человеческий фактор, попросту – наличие «дурака», придумать защиту от которого невозможно. Разница в том, что для взрыва АЭС необходимо большее количество «неадекватных специалистов», действующих на разных уровнях управления и разрушающих среду безопасности одним своим присутствием.

Главная задача поддержания действенности среды безопасности как отражения общего уровня организационно-технической культуры – исключить инородные, разрушительные для отрасли тела и явления. Уместно предположить, что управляемость и надежность функционирования ЭЭС в современных условиях требуют более широкого и, иначе, структурированного толкования этих категорий и соответственно их анализа. В ряде случаев проблема необеспечения надежности функционирования как потери управляемости энергетических объектов выходит за пределы компетенции отрасли: аварии на ЧАЭС и АЭС «Фукусима» – яркое тому подтверждение.

Первопричиной аварии на ЧАЭС стало разрушение среды безопасного функционирования атомной энергетики гражданского назначения, начало которого было положено выводом отрасли из подчинения Министерству среднего машиностроения СССР (ядерные технологии, ракетостроение и обеспечение исследований космоса), имевшего особый статус и традиции обеспечения управляемости. Деградация государственного управления на закате существования Советского Союза завершила его.

Причиной аварии на АЭС «Фукусима» стала несформированность адекватной времени среды безопасности, когда стратегия развития энергетической отрасли страны в направлении использования ядерных реакторов была выбрана в ущерб национальной безопасности (сверхактивная сейсмическая зона расположения Японии) и в угоду зарубежным держателям и поставщикам технологий АЭС. При проектировании станции стремление к «эффективному», либеральному управлению привело к экономии на максимальном уровне защиты от землетрясения (8 баллов защиты при фактических 8,9 на момент аварии) и неучету вероятности наложения землетрясения и цунами для АЭС, расположенной на берегу океана.

Авария на Саяно-Шушенской ГЭС в чем-то повторяет сценарий чернобыльской трагедии: на ответственных должностях появились недобросовестные и некомпетентные специалисты, над действиями которых был утрачен государственный надзор. Но вместо исторического катаклизма худший вариант потери управляемости стратегическим объектом стал результатом осознанного реформирования отрасли. Прочие итоги десятилетия приватизации электроэнергетики России иначе, как скорбными, не назовешь [5]:

- нехватка мощностей, веерные отключения, катастрофическая авария в Москве в 2005 г.;
- снижение качества электроэнергии;
- экономия издержек за счет снижения запасов и резервов материалов, топлива, генерирующих мощностей;
- снижение технологической дисциплины, качества ремонта и обслуживания оборудования;
- утрата стимулов для долгосрочных инвестиций;
- невозможность обеспечения надежности экономическими (рыночными) механизмами;
- деформация функций и имиджа государственного управления и энергетического надзора.

Предлагаемый рецепт исцеления – массированные государственные инвестиции в отрасль.

Совершенствование системы управления. Актуальной задачей управления функционированием и развитием белорусской электроэнергетики, сохранения и повышения ее управляемости на данном этапе является совершенствование системы управления [6]. Перед электроэнергетикой стоят колоссальные, но вполне реальные задачи. Долгие годы недофинансирования, естественного упадка и отсутствие доступа к современным технологиям сложились в блок проблем, требующих срочного разрешения. И все возможности для этого есть. Организационно и методически электроэнергетика готова к решению давно назревших задач, если развитие будет идти в русле ответственного государственного контроля [7].

Одновременно перед Беларусью стоит задача интеграции с энергосистемами соседних стран, в первую очередь России и Казахстана, в рамках Евразийского экономического союза (ЕАЭС) [8]. Экономика и энергетика этих стран существенно либеральнее белорусских, и бизнес-интеграция потребует, кроме развития своей отрасли, либерального ее реформирования и адаптации к условиям внешнего взаимодействия. Анализ путей и результатов либерализации электроэнергетики на постсоветском пространстве позволяет белорусской энергетике и системе ее управления вместо бездумной ломки пройти плановый управляемый переход к рыночным механизмам функционирования. Основными принципами реформирования следует считать:

- сохранение устойчивого функционирования и технической управляемости отрасли;
- постепенность и поэтапность преобразований, мониторинг и текущую корректировку хода реформ;
- сохранение исключительного права государства на оперативно-диспетчерское управление энергосистемой.

Таким образом, совершенствование системы управления отраслью заключается в решении ряда практических задач.

Оперативно-диспетчерское управление (ОДУ). В настоящее время диспетчерское управление Белорусской объединенной энергетической системой (ОЭС) осуществляет РУП «ОДУ», координируя работу центральных диспетчерских служб (ЦДС) РУП-облэнерго. Для реализации эффективного ОДУ необходимо:

- наделить РУП «ОДУ» полномочиями административного воздействия на РУП-облэнерго в части ведения режимов. Это позволит исключить из управления договорно-коммерческие отношения и передать функции оперативного управления областным филиалам РУП «ОДУ» вместо областных ЦДС, что позволит нивелировать отрицательные последствия поспешной и непродуманной дезинтеграции оперативного управления;
- структурам РУП «ОДУ» принимать непосредственное участие при формировании планов развития генерирующих источников и системообразующей сети;
- сохранить мировую практику признания деятельности по ОДУ исключительной сферой государственной монополии;
- обеспечить безусловное привлечение генерирующих мощностей ведомственного подчинения к регулированию мощности в соответствии с диспетчерским графиком нагрузки энергосистемы.

Восстановление организационной действенности ОДУ следует подкрепить техническим перевооружением и развитием:

- создать отраслевую интегрированную автоматизированную систему управления;
- модернизировать существующие сети связи и построить цифровые радиорелейные линии связи;
- унифицировать оперативно-вычислительные комплексы областных РУП, совершенствовать электронный документооборот и обеспечить переход на международные протоколы обмена информацией;

- обеспечить работу интегрированного информационно-управляющего комплекса ОДУ в режиме реального времени;
- внедрить современные информационные технологии расчетов режимов в темпе процесса и отображения информации коллективного использования;
- разработать автоматизированную систему поддержки принятия управленческих решений в области энергетической стратегии и энергопланирования.

В рамках повышения маневренности и эффективности управления электрическими станциями следует:

- оснастить энергоблоки системой мониторинга переходных процессов;
- расширить регулировочный диапазон мощности энергосистемы;
- создать центральный автоматический регулятор частоты и перетоков активной мощности;
- заменить критерий прироста относительного расхода условного топлива на критерий прироста цены топлива при оптимизации распределения нагрузки.

Совершенствование организационно-экономического управления ОЭС следует провести в следующих направлениях:

- обеспечить независимость системы управления энергосистемой от формы собственности субъектов хозяйствования, участвующих в этом процессе;
- сохранить централизованное оперативное управление всеми стадиями производства и транспортировки электроэнергии;
- определить окончательную структуру управления электроэнергетикой и глубину участия государства;
- разработать систему дифференциации тарифов на производство, передачу, распределение и продажу электроэнергии.

Интеграция в общий электроэнергетический рынок (ОЭР) стран Единого экономического пространства [9]. Собственная модель реформирования и функционирования энергетики Беларуси, различие исходных стартовых условий формируют конфликт интересов с энергетическими рынками России и Казахстана [10]:

- отсутствие собственных углеводородов и рынка первичных энергоресурсов делает белорусских производителей электроэнергии автоматически неконкурентоспособными;
- принципы оплаты и непрозрачность платежей за мощность на оптовом рынке электроэнергии России фактически блокируют экспортный потенциал белорусской энергосистемы;
- остаточное перекрестное субсидирование в Беларуси не позволяет формировать и использовать тарифы, обеспечивающие конкурентоспособность.

Соблюдение интересов отечественной энергетики, обеспечение управляемости отрасли в рамках территории Беларуси требуют ограничения функционирования ОЭР на уровне трансграничной торговли с сохранением структуры внутренних рынков государств-членов.

Таким образом, сдержанность и поэтапность проведения либерализации электроэнергетики, анализ вероятных рисков потери управляемости при смене механизма хозяйствования, совершенствование действующих меха-

низмов и технологий управления, внесение необходимых корректировок являются естественными средствами предотвращения вероятного хаоса внутри отрасли и противостояния недружественному поглощению извне.

ВЫВОДЫ

1. Управляемость как характеристика надежности системы управления определяется восприимчивостью среды к управляющим воздействиям, диапазоном допустимых изменений параметров и структуры, адекватностью и устойчивостью системы управления.

2. Либерализация отрасли приводит к замене критерия надежного функционирования на критерий получения прибыли, изменению структуры функционирования, цели и методов управления.

3. Анализ аварий локального и масштабного характера показывает, что основополагающий конфликт между выгодой и издержками обеспечения оказывает разрушительное действие на существующую систему управления, деформирует среду безопасности и приводит к потере управляемости во всех звеньях управления.

4. Модель либерализации Белорусской объединенной энергетической системы отличается соблюдением жесткого государственного управления с целью обеспечения технологической управляемости электроэнергетики и противоречит идеям либерализации государственных монополий.

5. Поиск оптимальной степени и глубины участия государства в управлении отраслью в переходный и постпереходный периоды осложняется необходимостью сохранения привлекательности отрасли для внешних инвесторов и сочленения объединенной энергетической системы Беларуси с энергосистемами ближайших соседей в рамках ЕАЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д а в ы д о в, А. В. Основы теории управления. Тематические лекции: учеб. пособие [Электронный ресурс] / А. В. Давыдов; Уральский государственный горный университет. – Режим доступа: <http://www.prodav.narod.ru/otu/index.html>. – Дата доступа: 07.02.2014.
2. Л а м а к и н, Г. Н. Основы менеджмента в электроэнергетике / Г. Н. Ламакин. – Тверь: ТГТУ, 2006. – 208 с.
3. П е т р у ш а, Ю. С. АСУ производством и сбытом электроэнергии в условиях либерализации отрасли / Ю. С. Петруша // Энергетика... Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2013. – № 2. – С. 37–42.
4. Г и т е л ь м а н, Л. Д. Энергетический бизнес / Л. Д. Гительман, Б. Е. Ратников. – М.: Дело, 2006. – 600 с.
5. В о р о п а й, Н. И. Концепция обеспечения надежности в электроэнергетике / Н. И. Воропай, Г. Ф. Ковалев, Я. Н. Кучеров. – М.: ООО ИД «Энергия», 2013. – С. 212.
6. П е т р у ш а, Ю. С. Управление функционированием и развитием ЭЭС / Ю. С. Петруша // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 12-й Международной научно-технической конференции: в 4 т. – Минск: БНТУ, 2014. – Т. 1. – С. 62–63.
7. Г о с у д а р с т в е н н а я программа развития Белорусской энергетической системы на период до 2016 г.: утверждена постановлением СМ РБ от 29.02.2012 № 194 // Нац. реестр правовых актов Респуб. Беларусь. – 13 марта 2012 г. № 5/35381.
8. Соглашение о формировании общего электроэнергетического рынка государств – участников Содружества Независимых Государств: соглашение Правительства Республики Беларусь от 25 мая 2007 г. [Электронный ресурс] // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <http://arc.pravoby.info/dok2007/part3/akt03167.htm>. – Дата доступа: 17.11.2014.
9. С о г л а ш е н и е об обеспечении доступа к услугам естественных монополий в сфере электроэнергетики, включая основы ценообразования и тарифной политики // Нац. реестр правовых актов Республики Беларусь. – 12 января 2011 г. № 3/2646.

10. В о р о п а й, Н. И. Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики / Н. И. Воропай, Н. А. Юсифбейли // Проблемы надежности систем энергетики в рыночных условиях. – Баку: АЗНИИПИИЭ, 2013. – Вып. 63. – 566 с.

REFERENCES

1. D a v y d o v, A. V. Framework of the Control Theory. Issue-Related Lectures. Elaterinburg: Ural State Mining University. Available at: <http://www.prodav.narod.ru/otu/index.html> (Accessed 7 February 2014) (in Russian).
2. L a m a k i n, G. N. (2006) *Management Principles in Electric Power Industry*. Tver: TSTU [Tver State Technical University]. 208 p. (in Russian).
3. P e t r u s h a, Yu. S. (2013) Automatic Control System of Electric-Power Generation and Marketing under the Conditions of Industry Liberalization. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'Edinenii SNG – Energetika* [Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Energetika], 2, 37–42 (in Russian).
4. G i t e l' m a n, L. D., & Ratnikov, B. E. (2006) *Electric-Power Business*. Moscow, Delo Publ. 600 p. (in Russian).
5. V o r o p a i, N. I., Kovalev, G. F., & Kucherov, Iu. N. (2013). *The Concept of Reliability Assurance in Electric-Power Industry*. Moscow, Energia Publ. 212 p. (in Russian).
6. P e t r u s h a, Yu. S. (2014) The UES Functioning and Development Governance. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike. Materialy 12 Mezhdunarodnoi Nauch.-Tekhn. Konf. T. 1* [Science to Education, Industry, Economics. Proceedings of 12th International Science and Technical Conference. Vol. 1]. Minsk: BNTU, 62–63 (in Russian).
7. T h e S t a t e Program of Belorussian Energy System Development for the Period to 2016: Approved by the RB Council of Ministers Decree 29.02.2012 No 194. *Natsional'nyi Reestr Pravovykh Aktov Respubliki Belarus'* [The Republic of Belarus National Registry of Legislative Acts], March 13th 2012, No 5/35381 (in Russian).
8. T h e A g r e e m e n t on Forming the Common Electric-Power Market of the CIS Member States. The Agreement of the RB Government of May 25th 2007. *The National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <http://arc.pravoby.info/dok2007/part3/akt03167.htm> (Accessed 17.11.2014) (in Russian).
9. T h e A g r e e m e n t on Access Authorization to Natural Monopolies Services in the Sphere of Electrical Energy Industry Including Principles of Price Formation and Tariff Policy. *Natsional'nyi Reestr Pravovykh Aktov Respubliki Belarus'* [The Republic of Belarus National Registry of Legislative Acts], January 12th 2011, No 3/2646 (in Russian).
10. V o r o p a y, N. I., & Yusifbeyli, N. A. (2013) *Reliability Study Methodological Issues of Large Systems in Energetics*. Pub. 63: *Reliability Challenges of Energy Systems under Market Conditions*. Baku, Azerbaijan Scientific Research and Design Institute of Energy. 566 p. (in Russian).

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 15.12.2014

УДК 621.321

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СХЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД АТОМНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Канд. техн. наук, доц. СТАРЖИНСКИЙ А. Л.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: alexeystmink@gmail.com

Определена надежность схемы электроснабжения собственных нужд атомной электростанции. Рассмотрено поведение системы при нормальной работе блока и проведении текущих и капитальных ремонтов в сочетании с исходными событиями. Исходны-

ми событиями для реакторов считаются: полное обесточивание, т. е. потеря внешнего электроснабжения (нормального и резервного); аварийное отключение одного из работающих турбогенераторов; мгновенный сброс номинальной нагрузки до уровня собственных нужд с посадкой стопорного клапана одного турбогенератора. Сочетание любого исходного события с ремонтным режимом в случае возникновения отказа одного из элементов системы не должно приводить к обесточиванию более одной системы надежного питания. Это требование удовлетворяется с помощью независимости (электрической и конструктивной) систем надежного питания и автономности работы аварийных источников (дизель-генераторов и аккумуляторных батарей).

Показателями надежности системы электроснабжения собственных нужд атомной станции являются условные вероятности одновременного погашения одной, двух и трех секций надежного питания при условии возникновения исходного события и погашения одной, двух и трех секций надежного питания в режиме нормальной эксплуатации. Кроме того, это и частоты погашения одной и одновременно двух, трех и четырех секций нормальной эксплуатации в режиме нормальной работы блока. Установлено, что погашение одной секции шин нормальной эксплуатации и одной секции надежного питания системы собственных нужд, не приводящее к полному погашению собственных нужд станции, может произойти один раз в три года. Вероятность одновременного погашения двух и трех секций нормальной эксплуатации и двух секций надежного питания в течение срока службы станции маловероятна.

Ключевые слова: система электроснабжения, собственные нужды, электростанция, надежность.

Ил. 1. Табл. 3. Библиогр.: 10 назв.

ASCERTAINMENT OF ELECTRIC-SUPPLY SCHEMES RELIABILITY FOR THE ATOMIC POWER PLANT AUXILIARIES

STARZHINSKIY A. L.

Belorussian National Technical University

The paper completes ascertainment of electrical-supply scheme reliability for the auxiliaries of a nuclear power plant. Thereat the author considers the system behavior during the block normal operation, carrying out current maintenance, and capital repairs in combination with initiating events. The initiating events for reactors include complete blackout, i.e. the loss of outside power supply (normal and reserve); emergency switching one of the working turbo-generators; momentary dumping the normal rating to the level of auxiliaries with seating the cutout valve of one turbo-generator. The combination of any initiating event with the repairing mode in case of one of the system elements failure should not lead to blackout occurrence of more than one system of the reliable power supply. This requirement rests content with the help of the reliable power supply system self-dependence (electrical and functional) and the emergency power-supply operational autonomy (diesel generator and accumulator batteries).

The reliability indicators of the power supply system for the nuclear power plant auxiliaries are the conditional probabilities of conjoined blackout of one, two, and three sections of the reliable power supply conditional upon an initiating event emerging and the blackout of one, two, and three reliable power-supply sections under the normal operational mode. Furthermore, they also are the blackout periodicity of one and conjointly two, three, and four sections of normal operation under the block normal operational mode. It is established that the blackout of one bus section of normal operation and one section of reliable power-supply system of the auxiliaries that does not lead to complete blackout of the plant auxiliaries may occur once in three years. The probability of simultaneous power failure of two or three normal-operation sections and of two reliable power-supply sections during the power plant service life is unlikely.

Keywords: electrical supply system, auxiliaries, power plant, reliability.

Fig. 1. Tab. 3. Ref: 10 titles.

К системе электроснабжения собственных нужд (СН) атомной электрической станции (АЭС) предъявляются следующие требования: безотказность (бесперебойность), ремонтпригодность, живучесть, безопасность, устойчивоспособность, режимная управляемость. Требования безотказности и ремонтпригодности относятся к сети рабочего и резервного питания СН АЭС, живучести и безопасности – к сети надежного питания, устойчивоспособности и режимной управляемости – к качеству переходных процессов и действиям средств автоматики при изменении режимов работы систем электроснабжения СН [1, с. 242].

Перечисленные требования к системе электроснабжения СН в значительной степени определяют надежность и самой АЭС, включая ее безопасность как в нормальных, так и аварийных условиях.

Основное отличие электрической части АЭС от электрической части тепловой электростанции заключается в такой схеме питания собственных нужд, которая способна обеспечить гораздо более высокую надежность электроснабжения ответственных механизмов СН, чем на обычных электростанциях [2, с. 197].

Техническое обоснование схемных решений и мероприятий, направленных на повышение надежности системы электроснабжения СН, должно предусматривать рассмотрение поведения системы при нормальной работе блока и проведении текущих и капитальных ремонтов в сочетании с исходными событиями. Исходными событиями для реакторов типа ВВЭР считаются: полное обесточивание, т. е. потеря внешнего электроснабжения (нормального и резервного); аварийное отключение одного из работающих турбогенераторов; мгновенный сброс номинальной нагрузки до уровня собственных нужд с посадкой стопорного клапана одного турбогенератора.

Сочетание любого исходного события с ремонтным режимом в случае возникновения отказа одного из элементов системы не должно приводить к обесточиванию более одной системы надежного питания. Это требование удовлетворяется с помощью независимости (электрической и конструктивной) систем надежного питания и автономности работы аварийных источников (дизель-генераторов и аккумуляторных батарей).

Показателями надежности системы электроснабжения СН АЭС являются условные вероятности одновременного погашения одной, двух и трех секций надежного питания при условии возникновения исходного события и погашения одной, двух и трех секций надежного питания в режиме нормальной эксплуатации. Кроме того, это и частоты погашения одной и одновременного трех и четырех секций нормальной эксплуатации в режиме нормальной работы блока. При этом считается возможным проведение ремонтных работ на оборудовании открытого распределительного устройства высшего напряжения [1, с. 243].

Программа REISS, разработанная в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете на кафедре «Электрические станции», позволяет проводить анализ структурной надежности систем электроснабжения потребителей СН, включающих в себя источники рабочего, резервного и аварийного электроснабжения, передающие элементы, коммутационные аппараты и отдельных потребителей. Анализируемая схема должна иметь радиальную структуру построения, при которой в любом установившемся

режиме ее функционирования передача мощности к любому потребителю осуществляется лишь по единственно возможной цепи. Программа предназначена для вычисления частоты и длительности перерывов электроснабжения одновременно произвольного количества входящих в систему электроснабжения потребителей, а также коэффициента неготовности данных потребителей в отношении такого события [3, с. 72].

Реализованная в программе модель анализа структурной надежности позволяет вычислять частоты λ и длительности T погашений потребителей в нормальном режиме и в режимах аварийного простоя оборудования систем резервного и рабочего электроснабжения с учетом повреждений оборудования, возможности отказов в срабатывании устройств релейной защиты (РЗ) и коммутационной аппаратуры при отключении коротких замыканий, а также отказов в переключении на резервное электроснабжение из-за отказов в срабатывании автоматики, автоматического ввода резерва (АВР) и коммутационных аппаратов (КА) вводов рабочего и резервного питания [3, с. 73].

Значения λ и T в общем виде определяются по выражениям [3, с. 73]:

$$\lambda = \sum_{k=1} \lambda(k); \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{\lambda} \sum_k T(k) \lambda(k), \quad (2)$$

где $\lambda(k)$, $T(k)$ – частота и длительность смоделированных аварий k -го вида, приводящих к расчетному погашению,

$$\lambda(k) = q(k, j) \lambda(k, m) \prod_s Q(k, s); \quad (3)$$

$$T(k) = q(k, j) \lambda(k, m) \min \left\{ \frac{t(k, j)}{2}; t(k, m); t_{\text{оп}} \right\} \prod_s Q(k, s); \quad (4)$$

$q(k, j)$ – относительная длительность ремонтного простоя j -го элемента, о. е.; $\lambda(k, m)$ – частота повреждения m -го элемента схемы, 1/год; $t(k, m)$, $t(k, j)$ – длительность послеаварийного восстановления m -го и j -го элементов схемы, ч; $t_{\text{оп}}$ – время оперативных переключений, ч; $Q(k, s)$ – вероятность отказа в срабатывании s -го устройства РЗ, КА или АВР.

Коэффициент неготовности потребителей k_n вычисляется по формуле [2, с. 73]

$$k_n = \frac{T \lambda}{8760}. \quad (5)$$

Подготовка исходных данных сводится к нумерации элементов схемы в определенной последовательности. Затем составляется матрица связности [В]. Здесь для каждого коммутационного аппарата в порядке следования их номеров записываются номера примыкающих к ним узлов (источников питания, трансформаторов, секций шин, линий и отдельных потребителей).

Расчет надежности системы электроснабжения СН АЭС (рис. 1) [4, с. 37] выполним с помощью программы REISS. Алгоритм программы построен на основе метода дерева отказов.

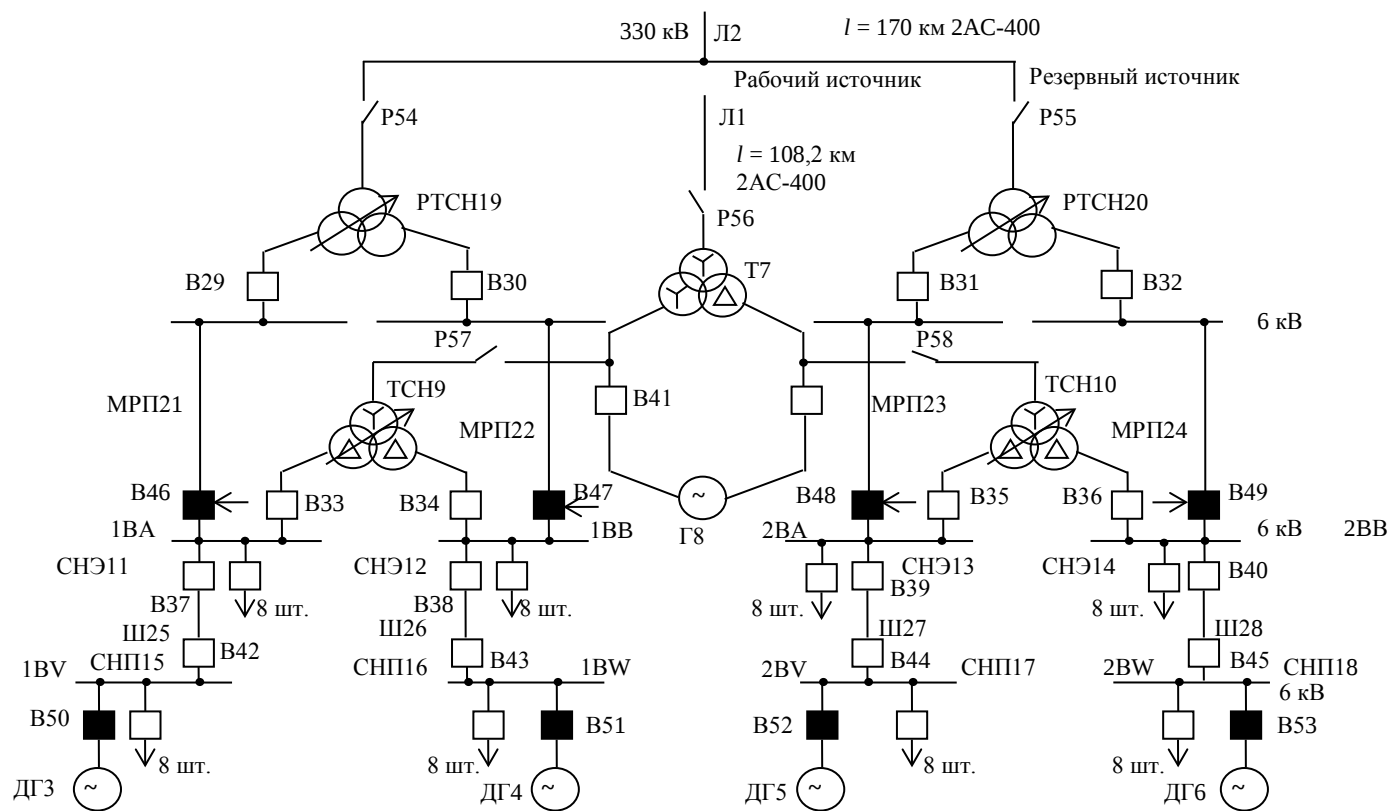


Рис. 1. Схема собственных нужд АЭС с реакторами ВВЭР-1200: Л – линия; ТСН – трансформатор собственных нужд; РТСН – резервный трансформатор собственных нужд; МРП – магистраль резервного питания; СНЭ – секция нормальной эксплуатации; СНП – секция надежного питания; ДГ – дизель-генератор; В – выключатель; Р – разъединитель; Г – генератор; Т – трансформатор; Ш – шины

Данные по надежности элементов СН электростанции приведены в табл. 1 [5, с. 270; 6, с. 67; 7, с. 105].

Таблица 1

Показатели надежности элементов собственных нужд электростанции

Элемент	Частота отказа λ , 1/год	Время после-аварийного восстановления $T_{в}$, ч	Частота планового ремонта $\lambda_{рем}$, 1/год	Длительность планового ремонта $T_{рем}$, ч
Блочный турбогенератор ТБВ-1200	1,0000	200	1,000	1080
Трансформатор 330 кВ мощностью более 80 МВА	0,0410	74	1,000	30
Сборные шины 6 кВ (на одно присоединение)	0,0300	5	0,166	5
Линия электропередачи 330 кВ на 1 км	0,0025	13,6	0,350	20
Дизель-генератор 6 кВ	0,0200	8,8	–	–
Рабочий трансформатор СН	0,0170	87	0,750	26
Резервный трансформатор СН	0,0410	74	1,000	30
Вакуумный выключатель 6 кВ	0,0040	8	0,200	8
Генераторный выключатель 20 кВ	0,0090	10	0,500	10

Результаты расчета надежности схемы СН АЭС представлены в табл. 2, 3.

Таблица 2

**Результаты расчета надежности электроснабжения собственных нужд АЭС
(погашение секций нормальной эксплуатации)**

Погашение секций нормальной эксплуатации	Суммарная частота события $\lambda_{сум}$, 1/год	Средняя продолжительность отключения T , ч	Коэффициент неготовности, о. е.
Одна секция шин (номера элементов 11)	0,3457	4,860	$0,1918 \cdot 10^{-3}$
Две секции шин (номера элементов 11, 12)	$0,3234 \cdot 10^{-2}$	7,155	$0,2642 \cdot 10^{-5}$
Три секции шин (номера элементов 11, 12, 13)	$0,1882 \cdot 10^{-2}$	4,356	$0,9357 \cdot 10^{-6}$
Четыре секции шин (номера элементов 11, 12, 13, 14)	$0,1921 \cdot 10^{-2}$	4,278	$0,9379 \cdot 10^{-6}$

Таблица 3

**Результаты расчета надежности электроснабжения собственных нужд АЭС
(погашение секций надежного питания)**

Погашение секций надежного питания	Суммарная частота события $\lambda_{сум}$, 1/год	Средняя продолжительность отключения T , ч	Коэффициент неготовности, о. е.
Одна секция шин (номера элементов 15)	0,3082	4,881	$0,1717 \cdot 10^{-03}$
Две секции шин (номера элементов 15, 16)	$0,3200 \cdot 10^{-6}$	0,500	$0,1826 \cdot 10^{-10}$
Три секции шин (номера элементов 15, 16, 17)	$0,1554 \cdot 10^{-08}$	0,500	$0,8870 \cdot 10^{-13}$
Четыре секции шин (номера элементов 15, 16, 17, 18)	$0,2182 \cdot 10^{-10}$	0,500	$0,1245 \cdot 10^{-14}$

Как видно из табл. 2, погашение секции шин нормальной эксплуатации 1BA (элемент 11) вероятно приблизительно один раз в три года.

При обесточивании секции 1BA отключаются два выключателя, связывающие ее с секцией 1BV, и запускается дизель-генератор. Погашение секции 1BV на время, большее, чем время пуска и включения дизель-генератора, может произойти при совпадении событий отказа в отключении двух выключателей или при незапуске дизель-генератора при отказе его выключателя при включении на секции 1BV [8, с. 104; 9, с. 97; 10, с. 147].

Погашения двух секций шин нормальной эксплуатации 1BA и 1BV на протяжении срока службы оборудования АЭС маловероятны и могут не приниматься во внимание.

Как видно из табл. 3, погашение секции шин надежного питания 1BV (элемент 15) также вероятно приблизительно один раз в три года. Погашение двух секций шин надежного питания 1BV и 1BW маловероятно и также может не приниматься во внимание.

ВЫВОДЫ

1. Выполнен расчет показателей надежности схемы электроснабжения собственных нужд атомной электростанции.

2. Установлено, что погашение одной секции шин нормальной эксплуатации и одной секции надежного питания системы собственных нужд, не приводящее к полному погашению собственных нужд станции, может произойти один раз в три года. Вероятность одновременного погашения двух и трех секций нормальной эксплуатации и двух секций надежного питания в течение срока службы станции маловероятна. Это указывает на высокую надежность рассмотренной схемы электроснабжения собственных нужд атомной электростанции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г у к, Ю. Б. Устройство, проектирование и эксплуатация схем электроснабжения собственных нужд АЭС / Ю. Б. Гук, В. М. Кобжув, А. К. Черновец. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 296 с.
2. Э л е к т р и ч е с к а я часть электростанций: учеб. для вузов / под ред. С. В. Усова. – 2-е изд. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. – 616 с.
3. Ч е р н о в е ц, А. К. Элементы САПР электрической части АЭС на персональных компьютерах / А. К. Черновец. – СПб.: Санкт-Петербург. гос. ун-т, 1992. – 89 с.
4. Ф е л ь д м а н, М. Л. Особенности электрической части атомных электростанций / М. Л. Фельдман, А. К. Черновец. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 172 с.
5. Э л е к т р о т е х н и ч е с к и й справочник: в 4 т. / под общ. ред. В. Г. Герасимова [и др.]. – 9-е изд. – М.: МЭИ, 2003. – Т. 3: Производство, передача и распределение электрической энергии. – 2004. – 964 с.
6. К о р о т к е в и ч, М. А. Анализ структурной надежности схем выдачи мощности от атомных электростанций / М. А. Короткевич // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – Вып. 64: Надежность систем энергетики: достижения, проблемы, перспективы. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2014. – С. 67–71.
7. В а с и л ь е в, А. П. Надежность электроэнергетических установок и систем: теория и практика / А. П. Васильев, Ю. Б. Гук, В. В. Карпов. – СПб.: ГУ «Ленгосэнергонадзор», 2000. – 413 с.
8. Г у к, Ю. Б. Теория надежности: учеб. пособие / Ю. Б. Гук, В. В. Карпов, А. А. Лапидус. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 171 с.

9. Гук, Ю. Б. Теория надежности в электроэнергетике: учеб. пособие / Ю. Б. Гук. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. – 208 с.

10. Гук, Ю. Б. Расчет надежности схем электроснабжения / Ю. Б. Гук, М. М. Синенко, В. А. Тремясов. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. – 216 с.

REFERENCES

1. G u k, Yu. B., Kobzhuv, V. M., & Chernovets, A. K. (1991) *Design, Projection, and Operation of Electric Power Supply Schemes of the APP Auxiliaries*. Moscow, Energoatomizdat. 296 p. (in Russian).

2. U s o v, S. V., Mikhalev, B. N., Chernovets, A. K., Kizevetter, E. N., & Kantan, V. V. (1987) *Electrical Annex of the Electric Power Plants*. 2nd ed. Leningrad, Energoatomizdat, Leningrad Department. 616 p. (in Russian).

3. C h e r n o v e t s, A. K. (1992) *CAD-Elements of the APP-Electrical Annex on the Personal Computers*. St. Petersburg: St. Petersburg State University. 89 p. (in Russian).

4. F e l'd m a n, M. L., & Chernovets, A. K. (1983) *Electrical Annex Distinctions of the Nuclear Power Plants*. Leningrad, Energoatomizdat. 172 p. (in Russian).

5. G e r a s i m o v, V. G., D'iakov, A. F., Il'inskii, N. F., Labuntsov, V. A., Morozkin, V. P., Orlov, I. N., & Stroeve, V. A. (2003) *Electrotechnical Book of Reference. Vol. 3: Generation, Transition, and Distribution of Electric Energy*. 9th ed. Moscow: MPEI [Moscow Power Engineering Institute]. 964 p. (in Russian).

6. K o r o t k e v i c h, M. A. (2014) Analysis of Structural Reliability of the Schemes of Power Output from Nuclear Power Stations. *Methodical Issues of Reliability Research of Large Systems of Energetics. Pub. 64: The Reliability of Energy Systems: Achievements, Problems and Prospects*. Irkutsk: ISEM SB RAS [Melentiev Energy Systems Institute Siberian branch of the Russian Academy of Sciences], 67–71 (in Russian).

7. V a s i l y e v, A. P., Guk, Yu. B., & Karpov, V. V. (2000) *Reliability of the Electric Installations and Systems: Theory and Practice*. St. Petersburg: State Institution Lengosenergonadzor. 413 p. (in Russian).

8. G u k, Yu. B., Karpov, V. V., & Lapidus, A. A. (2009) *Reliability Theory*. St. Petersburg: Polytechnic University Press. 171 p. (in Russian).

9. G u k, Yu. B. (1990) *Reliability Theory in Electrical Energy Industry*. Leningrad, Energoatomizdat, Leningrad department. 208 p. (in Russian).

10. G u k, Yu. B., Sinenko, M. M., & Tremyasov, V. A. (1990) *Reliability Calculation of the Power-Supply Circuitry*. Leningrad, Energoatomizdat, Leningrad Department. 216 p. (in Russian).

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 04.03.2015

УДК 621.311.1

О КОМПЛЕКСНОЙ ЗАПИСИ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ РАСЧЕТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ*

Инж. БАРО БАНДИА

Белорусский национальный технический университет

E-mail: elsyst@tyt.by

Предложены математически корректные обозначения координатных осей на комплексной плоскости для теоретических основ электротехники. Подобное предложение было сделано и относительно обозначений комплексов различных электрических величин (ЭДС, напряжений, токов, мощностей, сопротивлений и проводимостей). Показана важность соблюдения преемственности и единообразия в обозначениях. Исследуются различные формы записи комплексной мощности. Из известных форм записи обосо-

* Печатается в порядке обсуждения.

ванно выбрана адекватная физическим процессам и математически правильная. Известно, что расчет электрических цепей синусоидального тока можно выполнить, преобразовывая уравнения синусоид (тригонометрический метод). Это трудоемко. Можно перестроить временные диаграммы нужных синусоидальных функций (метод временных диаграмм), что наглядно, но неточно. Можно воспользоваться методом векторных диаграмм – это удобно, более наглядно, но, как любой графический метод, сравнительно неточно, громоздко, особенно для разветвленных цепей. Наконец, можно использовать символический метод, сохраняющий наглядность графического решения, так как по символической записи электрических величин легко построить векторную диаграмму. Данный метод дает возможность аналитически решать вопросы с любой степенью точности. Помимо этого, символический метод обладает непротиворечивостью получаемых результатов, что вытекает из неразрывной связи между различными методами представления синусоидальных функций. Между этими методами не должно существовать никаких противоречий. Это и есть главное достоинство предложенной формы записи полной мощности при расчете электрических систем, что позволяет избежать досадных ошибок.

Ключевые слова: реактивное сопротивление цепи, падение напряжения на реактивном сопротивлении, угол сдвига фаз между напряжением и током, реактивная мощность, полная мощность, комплекс.

Ил. 8. Библиогр.: 19 назв.

ON THE COMPLEX FORMULA OF THE APPARENT POWER IN CALCULATIONS OF THE ELECTRICAL SYSTEMS

BARO BANDIA

The paper offers the mathematically correct notation of the coordinate axes on the plain of complex numbers for Theoretical Science of Electrical Engineering. The complexes of various electrical quantities (electromotances, voltages, currents, capacities, resistances, and conductivities) are proposed to notate similarly showing the significance of observing continuity and uniformity in notation. The author studies various forms of complex power notation. Of all forms of notation currently in use, he reasonably chooses the one mathematically proper and solely adequate to the physical processes. It is known that the calculation of the sine-wave current electrical circuits can be performed by way of transposing the sinusoidal equation (the trigonometrical method) which is cumbersome. Recomposing time diagrams (the time-diagram method) of the required sinusoidal functions is demonstrative, however unveracious. The phasor-diagram method is convenient, more pictorial but, like any other graphical approach, moderately inaccurate, cumbersome especially for branched circuits. And finally symbolic (or complex) method which retains visual expressiveness of graphical solution since it is easy to build a phasor diagram by the symbolic notation of electrical quantities. The given method allows analytical solving issues with any degree of precision. Beyond that, the symbolic method holds consistency of the obtained results which follows from the inextricable link between different presentation-methods of the sine functions. There should be no contradictions between these methods which is the principle merit of the proposed notation form. And that will allow avoiding embarrassing mistakes.

Keywords: reactive impedance of the electric circuit, voltage drop across the inductive reactance, phase shift between the current and the voltage, reactive power, apparent power, complex.

Fig. 8. Ref.: 19.

Постановка вопроса. В настоящее время существуют несколько способов записи полной мощности в комплексной форме. В [1–7] комплексная мощность определяется по формулам:

$$\dot{S} = P - jQ, \quad (1)$$

или

$$\underline{S} = P - jQ. \quad (2)$$

В [3, 4, 6–14] комплексную мощность находят также по выражениям:

$$\dot{S} = P + jQ, \quad (3)$$

или

$$\underline{S} = P + jQ. \quad (4)$$

Общим для формул комплексной мощности [3, 4, 6, 7, 15] является признание следующей записи:

$$\dot{S} = P \pm jQ. \quad (5)$$

Каждый из авторов пытается обосновать свой способ написания данной формулы. Так, в [3], изданной в 1960 г., говорится, что совпадение знаков у комплексов реактивного индуктивного (отстающего от напряжения) тока

$$\dot{I} = I_a - I_r$$

и реактивной мощности указывает на то, что выражение (1) соответствует потреблению приемником реактивной индуктивной мощности, а (3) – потреблению реактивной емкостной мощности. Автор указывает также, что в линиях электропередачи обычно имеет место одинаковое направление активной и реактивной индуктивной мощностей – от источника энергии к потребителю. Однако в некоторых случаях, считает автор [3], в зависимости от соотношения активных и реактивных мощностей генерирующей и приемной частей схемы (например, при наличии мощных синхронных компенсаторов в приемной части) или на каком-либо участке замкнутой сети при некотором распределении в ней сосредоточенных нагрузок с различными коэффициентами мощности может иметь место встречное направление активной и реактивной мощностей. Эти два случая согласного и встречного направлений активной и реактивной индуктивной мощностей необходимо различать при электрических расчетах сети, придавая соответствующие обозначения в выражениях полной мощности. Именно поэтому надо использовать (1) при согласном направлении активной и индуктивной мощностей (при отстающем токе линии) и, аналогично, выражение (3) – при встречном направлении реактивной мощности (при опережающем токе линии). При определении в схеме направления мощностей направление активной мощности принимается за положительное.

Налицо полное противоречие относительно (1). Тем не менее ученики автора [3] вплоть до 1968 г. [4] придерживались такого же мнения, но в 1977 г. изменили его [16]. Они решили, что изображение полной мощности в виде (1) означает, что знак плюс у мнимой части выражения характеризует потребление реактивной индуктивной мощности электроприемником (отстающая реактивная мощность нагрузки). Положительный знак у активной и реактивной составляющих полной мощности символизирует их одинаковое направление от генератора к потребителю, тогда как знак «минус» в (3) означает направление реактивной мощности, обратное по отношению к направлению активной мощности, что соответствует потреблению электроприемником емкостной реактивной мощности (опережающая реактивная мощность нагрузки) или, что тоже верно, выдаче им реак-

тивной индуктивной мощности в сеть. Такого же подхода придерживаются авторы [17].

В [5, 7] тоже ссылаются на совпадение знаков у реактивного тока и реактивной мощности в (1), правда, в [7] выбор сделан в пользу (3). При этом особо отмечается, что такой форме записи соответствует большая часть программ на ЭВМ.

Не только отдельные авторы, но и многие институты имеют также свои особые правила знакообразования, которые к тому же осложняются неопределенностью в обозначениях потокораспределения мощностей [18], как, например, на рис. 1, где показан поток линейной мощности, подводимой от узла 1 к узлу 2. Если в тексте не разъяснено, какое именно правило знакообразования использовалось, то направление потока реактивной мощности – от точки 1 к точке 2, или наоборот, – установить невозможно.

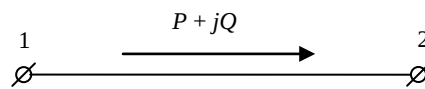


Рис. 1. Поток линейной мощности

В Московском, Ивановском энергетических, Одесском, Рижском политехнических университетах принято писать $\dot{S} = P + jQ$, что означает передачу реактивной индуктивной мощности от узла 1 к узлу 2.

В Львовском и Белорусском технических университетах принято писать $\dot{S} = P - jQ$, полагая, что поток реактивной индуктивной мощности идет из узла 2 в узел 1.

В Санкт-Петербургском и Киевском технических университетах пишут $\dot{S} = P + jQ$, подразумевая, что поток реактивной мощности направлен от узла 2 к узлу 1.

Из всего сказанного вытекает полная неясность в использовании выражений (1)–(3). Автор данной статьи своими исследованиями восполняет этот пробел.

Предполагаемое решение. Предварительные замечания. Часто в литературе по теоретическим основам электротехники и электрическим сетям и системам обозначают на комплексной плоскости действительную ось «+1» и мнимую «+j», как это показано на рис. 2.

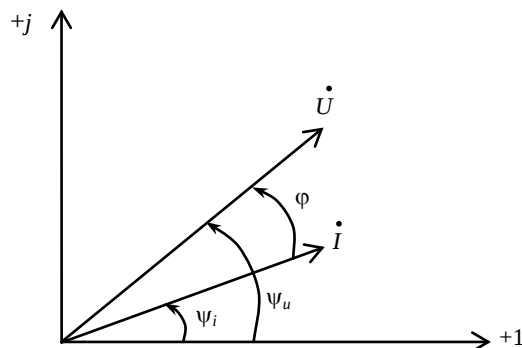


Рис. 2. Обозначение координатных осей на комплексной плоскости

Это не соответствует действительности, так как на комплексной гауссовской плоскости «1» и «j» есть орты координатных осей Re и Im , как показано на рис. 3.

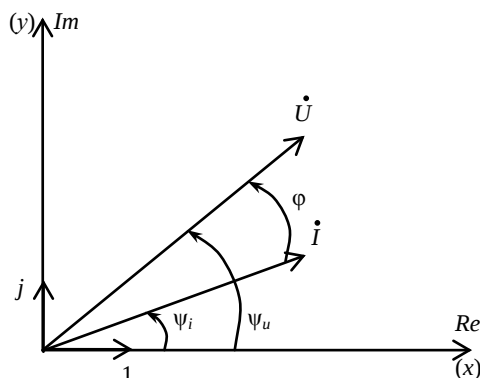


Рис. 3. Правильное обозначение координатных осей на комплексной плоскости

Обозначения (x) и (y) напоминают, что Re исполняет роль оси Ox на обычной декартовой плоскости действительных чисел (на ней размещается действительная часть комплексного числа), а Im – роль оси Oy (на ней размещается мнимая часть комплексного числа). Что касается обозначений Re и Im , то они восходят к французским словам réel (действительный) и imaginaire (мнимый) соответственно.

Орты «1» и «j» не нуждаются в каких-либо знаках. Это единичные векторы. Их направление совпадает с положительным направлением соответствующей оси. Они самодостаточны. При построении векторных диаграмм можно опускать не только орты «1» и «j», но и координатные оси Re и Im . Иначе вместо рис. 4а, б можно привести рис. 5, что делается ради упрощения, но при этом надо всегда учитывать рис. 3.

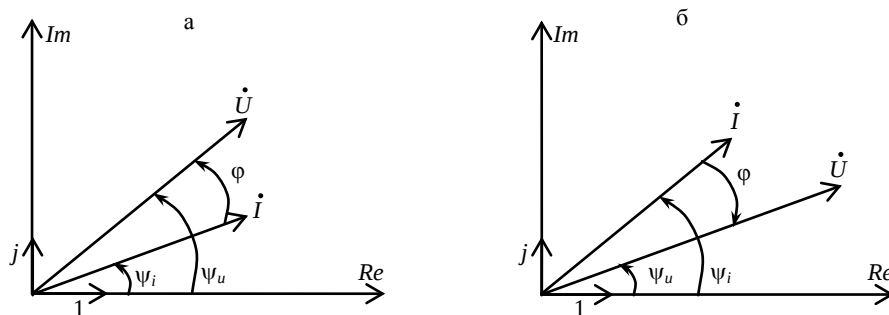


Рис. 4. Векторные диаграммы тока и напряжения электрической цепи с преобладанием нагрузок: а – индуктивной; б – емкостной

В [19] и ряде других работ отмечается, что точку над обозначением полного сопротивления Z не ставят, так как ее принято ставить только над комплексными величинами, которые представляют собой синусоидальные функции времени. Такой подход не продуктивен, поскольку комплексные числа были введены в электротехнику для упрощения расчетов. В самом деле, ток

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$$

может быть представлен комплексной функцией

$$\dot{I}(t) = I_m e^{j(\omega t + \psi_i)},$$

в которой можно выделить постоянную часть и часть, зависящую от времени:

$$\dot{I}(t) = I_m e^{j\psi_i} e^{j\omega t}.$$

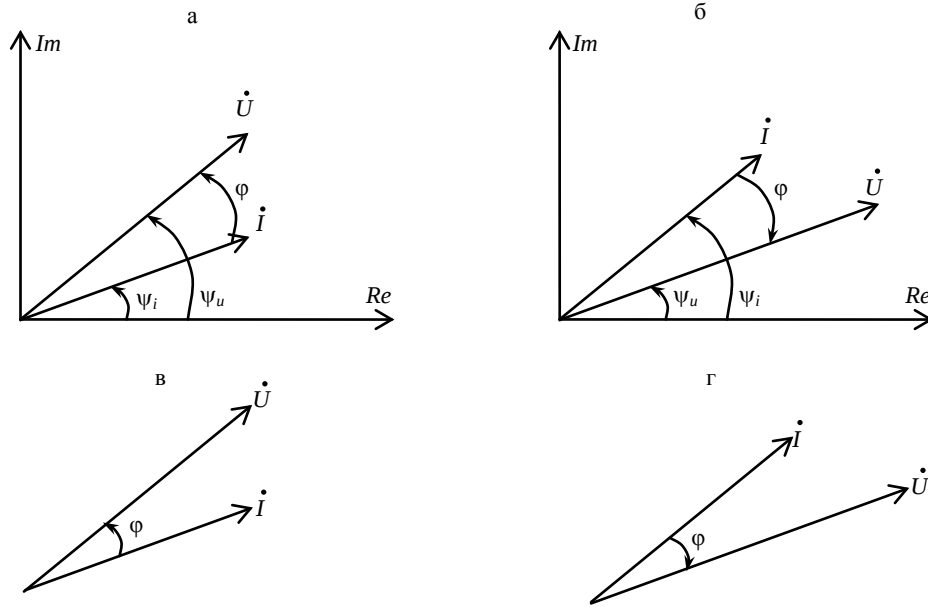


Рис. 5. Векторные диаграммы тока и напряжения электрической цепи

Как раз комплексное число $\dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i}$, модуль которого равен амплитуде I_m синусоидального тока, а аргумент ψ_i – его начальной фазе, есть, как известно, комплексная амплитуда синусоидального тока, а комплексную величину $\dot{I} = I e^{j\psi_i}$, где $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ называют комплексным действующим током или просто комплексным током. Но $\dot{I}_m$ и $\dot{I}$ – величины постоянные, не зависящие от времени. Поэтому можно и нужно ставить, как для других подобных величин, точку над обозначением полного комплексного сопротивления, т. е. писать $\dot{Z}$. Правильно же писать

$$\dot{S} = \dot{U} \dot{I}^* = \dot{U} \left(\frac{\dot{U}}{\dot{Z}} \right)^* = \frac{U^2}{Z^*}.$$

Все сказанное относится и к обратной к $\dot{Z}$ величине, т. е. к полной проводимости $\dot{Y}$. В противоположность этому некоторые авторы ставят значок «~» (тильда) над обозначением полной мощности и пишут $\tilde{S} = \dot{U} \dot{I}^*$ [19], подразумевая, что речь идет о комплексе (а не о сопряженном комплексе) полной мощности, составленном при участии сопряженного комплекса тока $\dot{I}^*$, а другие подчеркивают этот символ [17]:

$$\underline{S} = P + jQ \text{ или } \underline{S} = P \pm jQ.$$

То есть согласно требованиям ГОСТ 1494–77 синусоидальные величины, представляемые на комплексной плоскости бесконечно большим числом образов, следует обозначать точкой сверху $(\dot{U}, \dot{I})$, а комплексные числа, число образов которых конечно, надо подчеркивать $(\underline{Z}, \underline{Y}, \underline{S})$. Неудобство таких обозначений появляется сразу, если, например, из (3) найти прямой комплекс тока $\dot{I}$.

Можно избегать таких осложнений, если вспомнить, что на схемах цепей переменного тока над обозначениями действующих значений ЭДС, токов, напряжений, мощностей, сопротивлений и проводимостей всегда ставят стрелку (вектор) или точку (комплекс). Именно поэтому, например, законы Кирхгофа для переменного тока должны быть записаны так:

1) для мгновенных значений:

$$\sum i = 0;$$

$$\sum e = \sum u;$$

2) для векторов действующих значений:

$$\sum \vec{I} = 0;$$

$$\sum \vec{E} = \sum \vec{U};$$

3) для комплексов действующих значений:

$$\sum \dot{I} = 0;$$

$$\sum \dot{E} = \sum \dot{U}.$$

Однозначная запись полной мощности в комплексной форме. Переходим к комплексной записи полной мощности. Для этого рассмотрим простейшие цепи однофазного переменного тока, так как переход к трехфазной довольно простой.

Например, если для однофазной цепи:

$$P = UI \cos \varphi; \tag{6}$$

$$Q = UI \sin \varphi; \tag{7}$$

$$S = UI; \tag{8}$$

$$\varphi = \psi_u - \psi_i \text{ по определению,} \tag{9}$$

то для трехфазной вводится просто множитель $\sqrt{3}$ для P , Q и S . Здесь P , Q , S – соответственно активная, реактивная и полная мощности; φ – угол

сдвига фаз между напряжением и током, а ψ_u, ψ_i – начальные фазы напряжения и тока.

В указанных электрических цепях активное сопротивление R , индуктивность L и емкость C могут быть включены последовательно, параллельно или смешанно. Наиболее общим видом соединения этих элементов является последовательное, так как любое параллельное соединение можно привести к эквивалентному последовательному при условии, что при одинаковом напряжении ток в неразветвленной части обеих схем одинаков по величине и фазе. При смешанном же соединении расчет электрической цепи приводится к расчету последовательных и параллельных соединений, а сама цепь – к эквивалентной последовательной. Поэтому в данной статье будем ограничиваться последовательным соединением элементов электрической цепи однофазного переменного тока. Тогда пусть задана цепь, показанная на рис. 6.

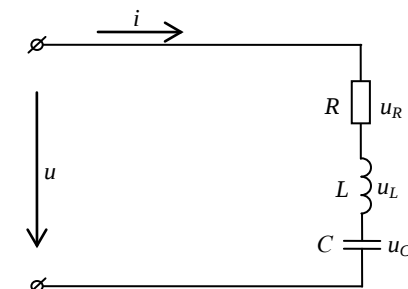


Рис. 6. Последовательная RLC -цепь

При прохождении тока i через эту цепь на ее зажимах создается падение напряжения, равное по второму закону Кирхгофа сумме падений напряжений на отдельных элементах:

$$u = u_R + u_L + u_C, \quad (10)$$

или в дифференциально-интегральной форме

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt. \quad (11)$$

Положим:

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u); \quad (12)$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i). \quad (13)$$

В символических обозначениях (12) будет изображаться комплексным числом

$$\dot{U} = U e^{j\psi_u}.$$

Уравнение (13) можно записать

$$\dot{I} = I e^{j\psi_i}.$$

Падение напряжения на активном элементе $u_R = RI_m \sin(\omega t + \psi_i)$ будет выражено комплексным числом

$$\dot{U}_R = RI e^{j\psi_i} R \dot{I}. \quad (14)$$

Падение напряжения запишем комплексным числом:

- на индуктивном элементе $u_L = L \frac{di}{dt} = L\omega \sin\left(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}\right)$

$$\dot{U}_L = L\omega I e^{j\left(\psi_i + \frac{\pi}{2}\right)} = jL\omega \dot{I};$$

- на емкостном элементе $u_C = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{I_m}{C\omega} \sin\left(\omega t + \psi_i - \frac{\pi}{2}\right)$

$$\dot{U}_C = \frac{I}{C\omega} e^{j\left(\psi_i - \frac{\pi}{2}\right)} = -j \frac{\dot{I}}{C\omega}.$$

Теперь перепишем уравнение (10) в символической форме

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C. \quad (15)$$

Положим:

$$\dot{U}_X = \dot{U}_L + \dot{U}_C; \quad (16)$$

$$X_L = L\omega; \quad X_C = \frac{1}{C\omega}; \quad X = X_L - X_C.$$

Тогда (11) можно записать:

$$\dot{U} = R \dot{I} + j\omega L \dot{I} = -j \frac{\dot{I}}{C\omega},$$

или

$$\dot{U} = [R + j(X_L - X_C)] \dot{I},$$

т. е.

$$\dot{U} = R \dot{I} + jX \dot{I},$$

или

$$\dot{U} = (R + jX) \dot{I}. \quad (17)$$

Откуда

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U e^{j\psi_u}}{I e^{j\psi_i}} = Z e^{j(\psi_u - \psi_i)} = Z e^{j\varphi} = \dot{Z} = R + jX = \sqrt{R^2 + X^2} e^{j \arctg \frac{X}{R}}.$$

Это означает:

$$\dot{Z} = R + jX; \quad (18)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2};$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}. \quad (19)$$

Теперь из (17) получим

$$U e^{j\psi_u} = \sqrt{R^2 + X^2} e^{j\varphi} I e^{j\psi_i} = Z I e^{j(\psi_i + \varphi)}.$$

Это означает:

$$U = ZI;$$

$$\psi_u = \psi_i + \varphi;$$

$$\varphi = \psi_u - \psi_i.$$

Из (16) получим:

$$\dot{U}_X = j(X_L - X_C)\dot{I},$$

или

$$\dot{U}_X = jX \dot{I}. \quad (20)$$

Из этого следует, что вектор $\dot{U}_X$ перпендикулярен вектору $\dot{U}_R$. Здесь X_L , X_C , X – индуктивное, емкостное и реактивное сопротивления цепи соответственно; $\dot{U}_X$ – падение напряжения на реактивном сопротивлении.

Окончательно (15) можно записать

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_X. \quad (21)$$

Из (20) получим

$$\dot{U}_X = XI e^{j\left(\psi_i + \frac{\pi}{2}\right)},$$

т. е.

$$U_X = XI = U_L - U_C.$$

Из (14) выразим

$$\dot{U}_R = RI e^{j0},$$

т. е.

$$U_R = RI.$$

Следовательно, получим выражение

$$\frac{U_X}{U_R} = \frac{XI}{RI} = \frac{X}{R} = \operatorname{tg} \varphi. \quad (22)$$

Теперь выведем однозначную комплексную запись полной мощности. Для этого необходимо найти такое подходящее комплексное число, действительная и мнимая части которого, а также его модуль и аргумент, строго удовлетворили бы четырем последним уравнениям. Было бы просто написать: $\dot{S} = \dot{U} \dot{I}$, но тогда

$$\dot{S} = U e^{j\psi_u} I e^{j\psi_i} = UI e^{j(\psi_u + \psi_i)} = UI \cos(\psi_u + \psi_i) + jUI \sin(\psi_u + \psi_i).$$

Такое возможно только тогда, когда $\psi_i = 0$, а это нарушает обобщающий характер определения (9), поскольку φ – знакопеременная величина, тогда как ψ_u и ψ_i – знакопостоянны.

А может $\dot{S} = U \dot{I}^*$? Тогда

$$\dot{S} = U e^{-j\psi_u} I e^{j\psi_i} = UI e^{j(\psi_i - \psi_u)} = UI e^{-j\varphi} = UI \cos \varphi - jUI \sin \varphi.$$

Это возможно только в трех случаях: при нагрузке емкостного характера, когда $X_L < X_C$, или при нагрузке активного характера, когда $X_L = X_C$, или же, наконец, при чисто активной нагрузке, когда $X_L = X_C = 0$. Во всех трех случаях имеем дело с знакопостоянством угла сдвига фаз φ , что чуждо определению (9), так как φ – величина алгебраическая.

Наконец, рассмотрим такую запись: $\dot{S} = \dot{U} \dot{I}^*$. Тогда

$$\dot{S} = U e^{j\psi_u} I e^{-j\psi_i} = UI e^{j(\psi_u - \psi_i)} = UI e^{j\varphi},$$

или

$$\dot{S} = S e^{j\varphi} = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = P + jQ.$$

Откуда

$$\frac{Q}{P} = \operatorname{tg} \varphi. \quad (23)$$

Как видим, модуль, действительная и мнимая части, а также аргумент последнего комплекса строго и однозначно соответствуют уравнениям (6)–(9). Поэтому уравнение (3) есть однозначная и единственно адекватная комплексная запись полной мощности.

Строить векторные диаграммы и треугольники при комплексном методе расчета электрических цепей необязательно, но необходимо для проверки соответствия комплексных уравнений физической картине происходящих в цепи процессов. Если нет соответствия, значит, в формулу вкралась ошибка. Тогда по выражениям (15), (25), (18) и (3) построим векторные диаграммы тока и напряжения, а также треугольники напряжений, сопротивлений и мощностей в зависимости от знака X (рис. 7, 8).

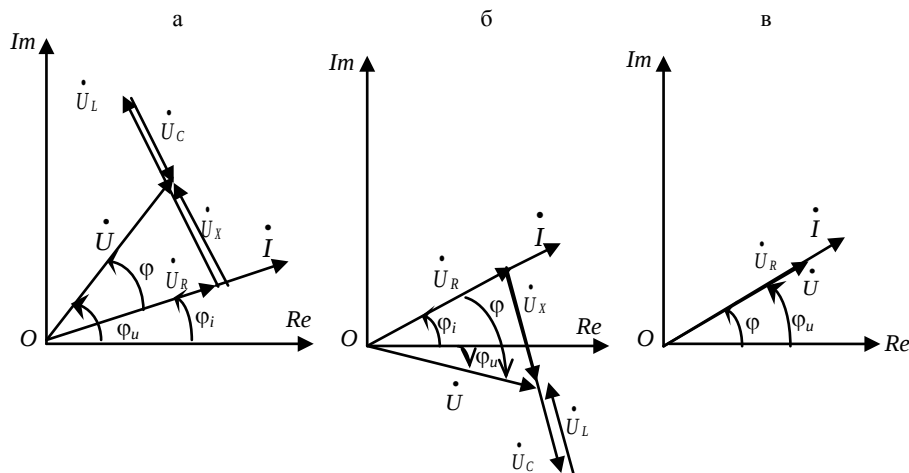


Рис. 7. Векторные диаграммы тока и напряжения в зависимости от знака X для последовательной RLC -цепи: а – $X > 0$, $U_X > 0$, $\varphi > 0$; б – $X < 0$, $U_X < 0$, $\varphi < 0$; в – $X = 0$, $U_X = 0$, $\varphi = 0$

Из (19), (22) и (23) получим также важную взаимозависимость

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R} = \frac{U_X}{U_R} = \frac{Q}{P}. \quad (24)$$

Эти соотношения подтверждают полное соответствие указанных уравнений физике явлений. Действительно, на рис. 7 первая векторная диаграмма относится к случаю, когда реактивное сопротивление $X > 0$, т. е. в цепи преобладает индуктивная нагрузка, ток $\dot{I}$ отстает от напряжения $\dot{U}$ и сдвиг фаз φ положительный, вторая – к случаю, когда реактивное сопротивление $X < 0$, т. е. в цепи преобладает емкостная нагрузка, ток $\dot{I}$ опережает напряжение $\dot{U}$ и сдвиг фаз φ отрицательный, а третья – к случаю, когда сопротивления X_L и X_C компенсируют друг друга или вообще отсутствуют, т. е. в цепи только активная нагрузка, ток $\dot{I}$ совпадает по фазе с напряжением $\dot{U}$, а сдвиг фаз φ равен нулю. Все сказанное в точности относится к треугольникам рис. 8.

Если же изобразить на комплексной плоскости комплексную мощность $\dot{S}$ по выражению (1), то соотношения (24) сразу нарушатся. Точнее, получится, что при преобладании индуктивной нагрузки φ и Q отрицательны, а при преобладании емкостной – положительны, что является неслыханным нарушением физики процессов.

Что касается алгебраической стороны вопроса, то мы пишем $\dot{Z} = R + jX$, хотя знаем, что $\dot{Z} = R + jX_L$ – при преобладании индуктивной нагрузки и $\dot{Z} = R - jX_C$ – при преобладании емкостной нагрузки, так как $X = X_L - X_C$. Пишем $\dot{Y} = G - jB$, хотя знаем, что $\dot{Y} = G - jB_L$ – при преобладании индуктивной нагрузки и $\dot{Y} = G + jB_C$ – при преобладании емкостной нагрузки, так как $B = B_L - B_C$.

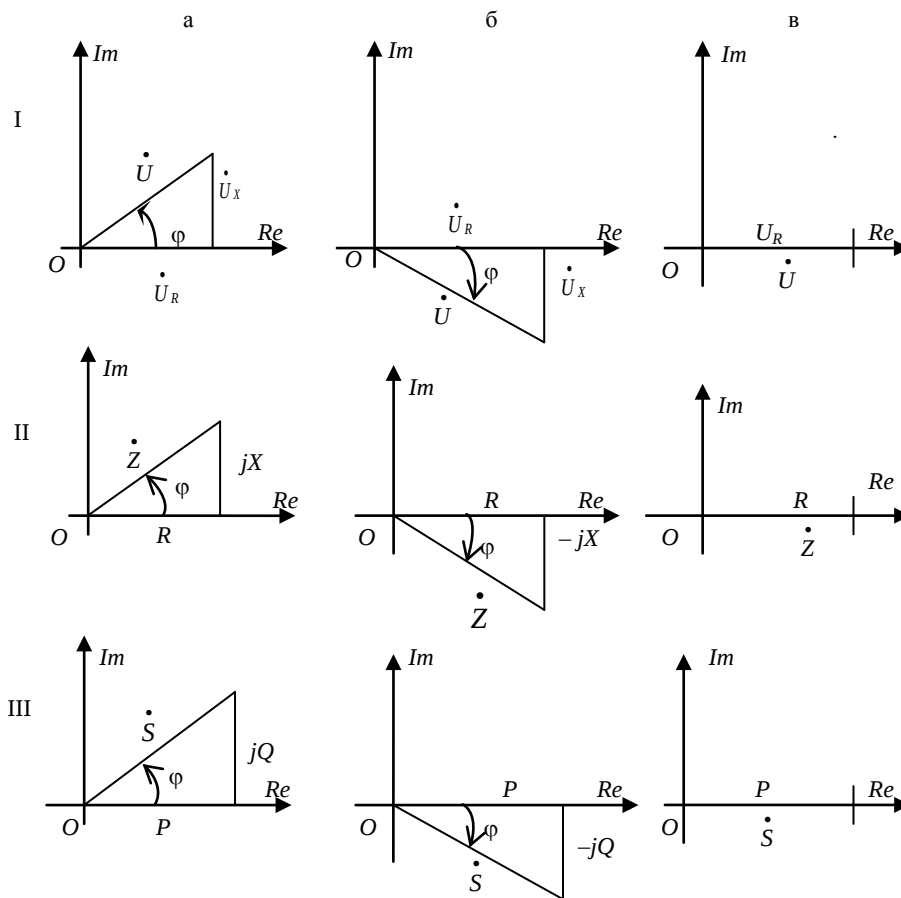


Рис. 8. Треугольники напряжений, сопротивлений и мощностей:

I:	$a - X > 0;$	$\bar{b} - X < 0;$	$b - X = 0;$
	$\dot{U}_X > 0;$	$\dot{U}_X < 0;$	$\dot{U}_X = 0;$
	$\varphi > 0;$	$\varphi < 0;$	$\varphi = 0;$
II:	$a - X > 0;$	$\bar{b} - X < 0;$	$b - X = 0;$
	$\varphi > 0;$	$\varphi < 0;$	$\varphi = 0;$
III:	$a - X > 0;$	$\bar{b} - X < 0;$	$b - X = 0;$
	$Q > 0;$	$Q < 0;$	$Q = 0;$
	$\varphi > 0;$	$\varphi < 0;$	$\varphi = 0$

Тут нет никаких дискуссий. Автор тоже положил конец дискуссиям и сомнениям при комплексной записи полной мощности. Надо писать

$$\dot{S} = P + jQ,$$

так как известно, что $\dot{S} = P + jQ_L$ – при преобладании индуктивной нагрузки и $\dot{S} = P - jQ_C$ – при преобладании емкостной нагрузки, поскольку $Q = Q_L - Q_C$.

ВЫВОДЫ

1. Произвольность в обозначениях координатных осей на комплексной плоскости недопустима, так как нарушается преемственность в науке. Это относится в должной мере и к обозначениям комплексных тока, напряжения, сопротивления, проводимости и мощности.

2. Поскольку φ и Q – алгебраические (знакопеременные) величины в отличие от φ_L , φ_C , Q_L и Q_C , которые являются знакопостоянными, нет никакой надобности в (1), тем более в (2), (4) и (5).

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазунов, А. А. Электрические сети и системы / А. А. Глазунов. – 4-е изд. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 368 с.
2. Поспелов, Г. Е. Электрические системы и сети. Проектирование: учеб. пособие для вузов / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин. – 2-е изд. – Минск: Выш. шк., 1988. – 308 с.
3. Рябков, А. Я. Электрические сети и системы / А. Я. Рябков. – 4-е изд. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 511 с.
4. Боровиков, В. А. Электрические сети и системы: учеб. для техникумов / В. А. Боровиков, В. К. Косарев, Г. А. Ходот. – 2-е изд. – Л.: Энергия, 1968. – 431 с.
5. Караев, Р. И. Электрические сети и энергосистемы / Р. И. Караев, С. Д. Волобринский. – М.: Транспорт, 1969. – 328 с.
6. Лыкин, А. В. Электрические системы и сети: учеб. пособие / А. В. Лыкин. – М.: Университетская книга; Логос, 2006. – 254 с.
7. Поспелов, Г. Е. Электрические системы и сети: учеб. / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин, П. В. Лычев. – Минск: Технопринт, 2004. – 720 с.
8. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети: учеб. для вузов / В. И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
9. Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии: учеб. пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – Ростов-на-Дону: Феникс; Красноярск: Издательские проекты, 2006. – 720 с.
10. Солдаткина, Л. А. Электрические сети и системы / Л. А. Солдаткина. – М.: Энергия, 1972. – 272 с.
11. Мельников, Н. А. Электрические сети и системы / Н. А. Мельников. – М.: Энергия, 1969. – 456 с.
12. Электрические системы: учеб. пособие для электроэнергетич. специальностей вузов: в 7 т. / В. А. Веников [и др.]. – М.: Высш. шк., 1970. – Т. 2: Электрические сети. – 1971. – 440 с.
13. Электрические системы и сети в примерах и иллюстрациях: учеб. пособие для электроэнергетических спец. / В. В. Ежков [и др.]; под ред. В. А. Строева. – М.: Высш. шк., 1999. – 352 с.
14. Блок, В. М. Электрические сети и системы: учеб. пособие для электроэнергетических спец. вузов / В. М. Блок. – М.: Высш. шк., 1986. – 430 с.
15. Шиманская-Семёнова, Т. А. Применение матричных моделей для расчета и анализа режимов электрических сетей: методич. пособие по изучению дисциплины «Математические модели в энергетике» для студ. спец. «Электроэнергетические системы и сети» / Т. А. Шиманская-Семёнова. – Минск: БНТУ, 2010. – 158 с.
16. Боровиков, В. А. Электрические сети энергетических систем: учеб. для энергетических и энергостроительных техникумов / В. А. Боровиков, В. К. Косарев, Г. А. Ходот. – 3-е изд. – Л.: Энергия, 1977. – 392 с.
17. Электрические системы. Электрические сети: учеб. для электроэнергетических спец. вузов / В. А. Веников [и др.]; под ред. В. А. Веникова, В. А. Строева. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 1998. – 511 с.
18. Колесниченко, Б. В. Расчеты электрических сетей на программируемых калькуляторах / Б. В. Колесниченко, Л. И. Петренко. – Киев: Выш. шк., 1988. – 207 с.
19. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: в 3 ч. / Л. А. Бессонов. – 5-е изд. – М.: Высш. шк., 1967. – 776 с.

REFERENCES

1. Glazunov, A. A. (1960) *Electric Power Grids and Systems*. 4th ed. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat. 368 p. (in Russian)
2. Pospelov, G. E., & Fedin, V. T. (1988) *Electric Power Systems and Grids. Projecting*. 2nd ed. Minsk, High School. 308 p. (in Russian).
3. Ryabkov, A. Ya. (1960) *Electric Power Grids and Systems*. 4th ed. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat, 511 p. (in Russian).
4. Borovikov, V. A., Kosarev, V. K., & Khodot, G. A. (1968) *Electric Power Grids and Systems*. 2nd ed. Leningrad, Energia. 431 p. (in Russian).
5. Karayev, R. I., & Volobrinskiy, S. D. (1969) *Electric Power Grids and Power Systems*. Moscow, Transport. 328 p. (in Russian).
6. Lykin, A. V. (2006) *Electric Power Systems and Grids*. Moscow, University Book; Logos. 254 p. (in Russian).
7. Pospelov, G. E., Fedin, V. T., & Lychev, P. V. (2004) *Electric Power Systems and Grids*. Minsk, Technoprint. 720 p. (in Russian).
8. Idelchik, V. I. (1989) *Electric Power Systems and Grids*. Moscow, Energoatomizdat. 592 p. (in Russian).
9. Gerasimenko, A. A., & Fedin, V. T. (2006) *Electric Power Transmission and Distribution*. Rostov-on-Don, Phoenix; Krasnoyarsk, Publishing Projects. 720 p. (in Russian).
10. Soldatkina, L. A. (1972) *Electric Power Grids and Systems*. Moscow, Energia. 272 p. (in Russian).
11. Melnikov, N. A. (1969) *Electric Power Grids and Systems*. Moscow, Energia. 456 p. (in Russian).
12. Venikov, V. A., Glazunov, A. A., Zhukov, L. A., & Soldatkina, L. A. (1971) *Electric Power Systems. Vol. 2. Electric Power Grids*. Moscow, High School. 440 p. (in Russian).
13. Yezhkov, V. V., Zarudskii, G. K., Zuev, E. N., Nadezhdin, S. V., Rokotian, I. S., Ryzhov, Iu. P., Stroeve, V. A., Fedchenko, V. G., Fokin, Iu. A., & Shelukhina, T. I. (1999) *Electric Power Systems and Grids in Exempla and Illustrations*. Moscow, High School. 352 p. (in Russian).
14. Block, V. M. (1986) *Electric Power Systems and Grids*. Moscow, High School. 430 p. (in Russian).
15. Shiman'skaya-Semyonova, T. A. (2010) *Matrix Models Application for Computation and Analysis of the Power Grid Regimes*. Minsk: BNTU. 158 p. (in Russian).
16. Borovikov, V. A., Kosarev, V. K., & Khodot, G. A. (1977) *Electric-Power Grids of the Electric-Power Systems*. 3rd ed. Leningrad, Energia. 392 p. (in Russian).
17. Venikov, V. A., Glazunov, A. A., Zhukov, L. A., Zuev, E. N., Liseev, M. S., Nadezhdin, S. V., Soldatkina, L. A., & Stroeve, V. A. (1998) *Electric-Power Systems. Electric-Power Grids*. 2nd ed. Minsk, High School. 511 p. (in Russian).
18. Kolesnichenko, B. V., & Petrenko, L. I. (1988) *Computations of the Electric-Power Grids on the Programmable Calculators*. Kiev, High School. 207 p. (in Russian).
19. Bessonov, L. A. (1967) *Theoretical Science of Electrical Engineering*. 3 part. 5th ed. Minsk, High School. 776 p. (in Russian).

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 19.08.2014

УДК 536.24

ЭКСЕРГИЯ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Докт. техн. наук, проф. РОМАНИУК В. Н., асп. МУСЛИНА Д. Б.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: Dasha106515@gmail.com

Решена задача определения эксергии вещества в потоке для текстильных и трикотажных материалов на базе термодинамического анализа соответствующих технических систем. Эксергетический метод позволяет произвести оценку энергетической эффективности для наиболее проблемных теплотехнологических систем преобразования вещества и наметить пути снижения энергетической составляющей себестоимости продукции. Актуальность проблемы обусловливается известным изменением ситуации на мировом энергетическом рынке и обострена необходимостью сохранить и наращивать экспортный потенциал легкой промышленности как важной составляющей народнохозяйственного комплекса республики. Эксергетический метод известен достаточно давно, интерес к нему проявляется и затухает с периодичностью смены поколений исследователей. Охлаждение к указанному методу каждого нового поколения объясняется чаще всего нерешенностью задачи расчета эксергии различных материалов, что создает проблему в ходе анализа систем преобразования вещества. Обозначенная задача, как правило, не представляет трудности для систем преобразования энергии, но для систем преобразования вещества ситуация намного сложнее. Это связано, прежде всего, с многообразием материалов и соответственно особенностями определения такой компоненты эксергии вещества в потоке, как химическая составляющая. Отсутствие решения нахождения химической составляющей эксергии вещества не позволяет в полном объеме провести термодинамическую оценку энергообеспечения теплотехнологического процесса, без чего усложняются и принятие решений, и определение путей снижения энергопотребления. Все изложенное актуально для текстильной индустрии и, прежде всего, для отделочных производств.

Представлено решение задачи расчета эксергии вещества в потоке для наиболее распространенных типов волокон – натуральных волокон животного и растительного происхождения, а также искусственных волокон. Причем для различных красителей – основных, кислотных и дисперсных. Рассмотрены составляющие эксергии вещества: реакционная, концентрационная и термомеханическая, представлены их расчет, соотношение и погрешность определения. Приведены примеры и результаты расчетов эксергии упомянутых окрашенных материалов.

Ключевые слова: эксергия текстильных материалов, эксергия вещества в потоке, термомеханическая, концентрационная, реакционная составляющие удельной массовой эксергии.

Ил. 1. Табл. 3. Библиогр.: 41 назв.

EXERGY OF TEXTILE MATERIALS

ROMANIUK V. N., MUSLINA D. B.

Belorussian National Technical University

The article presents solution for the task of evaluating exergy of the substance in the flow for textile and woven fabrics based on thermodynamic analysis of the corresponding technical systems. The exergy method allows estimating the energy effectiveness for the most proble-

matic heat-technological systems of substance transformation and thus outlining the ways for decreasing the electric-power component in the production prime cost. The actuality of the issue stems from the renowned scenario alteration on the world energy market and is aggravated by necessity of retaining and building up the export potential of the light industry as an important component of the republic national-economic complex. The exergy method has been here for quite a long time and saw the interest fading and appearing again with periodicity of the research-generations alternation. Cooling down of every new generation towards the specified method is explained mostly by unresolved problem of the exergy evaluation for diverse materials, which poses a problem in the course of analysis of the substance transformation systems. The specified problem as a general rule does not create obstacles for energy-conversion systems. However, the situation with substance-transformation systems is by far more complicated primarily due to diversity of the materials and respectively of the specification peculiarities of such component of the substance exergy in the flow as chemical component. Abeyance of conclusion in finding the chemical component of the substance exergy does not allow performing thermodynamic valuation of the energy provision for the heat-technological process in full measure. Which complicates the matters of decision-making and finding a medium for reduction of their energy consumption. All stated above relates to the textile industry and in the first instance to the finishing production departments.

The authors present the exergy-evaluation problem solution for the substance in the flow for the most common fiber-types: natural animal and phytogenic ones as well as artificial fibers. Moreover, they present the solution for different colorants – basic, acid-type, dispersed. The paper considers the following components of substance exergy: reaction, concentration, and thermomechanical with presentation of their computation, correlation, and assessment deviation. The examples and exergy-computation results of the mentioned coloured fabrics are shown.

Keywords: exergy of textile materials, substance exergy in the flow, thermomechanical, concentration, reaction components of the mass-flow exergy.

Fig. 1. Tab. 3. Ref.: 41 titles.

Введение. Важнейшей задачей, стоящей перед специалистами хозяйственного комплекса Беларуси, являются в том числе обеспечение стандарта уровня жизни населения страны [1, 2], разработка новой долгосрочной стратегии совершенствования экономики Беларуси на период до 2030–2050 гг., гармонично сочетающей инновационные и эволюционные изменения хозяйственного механизма. Чрезвычайно актуально определить тенденции дальнейшего развития промышленных предприятий непосредственно на местах, поскольку поддержка государства не может быть бесконечной. Уже к 2020 г. в мире прогнозируется резкий рост стоимости всех ресурсов, что может повлечь падение производства на фоне растущего загрязнения окружающей среды и вызванное им изменение климата [3, 4]. Разработка первоочередных мер по модернизации не только экономического механизма страны, но и каждого предприятия в отдельности в связи с грядущими изменениями на сырьевых и энергетических рынках необходима и очень своевременна. Решение этой задачи в полной мере связано с развитием отрасли легкой промышленности, продукция которой в рамках ВВП невелика (3,8 %), но значима для населения и составляет до 40 % внутреннего потребления непродовольственных товаров Беларуси [5, 6]. Кроме того, отрасль должна увеличить свой вклад в суммарный экспорт страны, который в настоящее время составляет основу экономики и доходит до 90 % всей продукции [7–9]. Продукция отрасли испытывает острейшую конкуренцию на внутреннем и внешнем рынках. Это диктует необходимость не только перманентного повышения качества, конкурентоспособности, гибкого обновления ассортимента, что отмечалось президентом Беларуси на встрече с предпринимателями 17 марта 2015 г. [10], но и снижение ее себестоимости. Здесь решения ограничены, поскольку

энергоносители, сырье и комплектующие для предприятий отрасли, как правило, импортируются и цены на них определяются внешними рынками.

Положение усугубляется тем, что в государствах СНГ не производится оборудование для легкой промышленности. Современные технологические линии и агрегаты закупаются в странах дальнего зарубежья, что связано с повышенными объемами инвестиций и как следствие со значительной долей амортизационной составляющей в себестоимости [11–13]. В этой ситуации остается ограниченное число путей для снижения себестоимости продукции отрасли: сокращать расходы на энергообеспечение предприятий и заработную плату с неизбежным ухудшением уровня жизни персонала. Поскольку последнее нежелательно, остается лишь снижать энергозатраты на обеспечение технологического процесса. Потенциал этого направления иллюстрирует пример российских предприятий, где только за счет роста тарифов на энергоресурсы за 2010–2011 гг. произошел резкий скачок энергетической составляющей себестоимости продукции с 11,8 до 14,0 % [14].

Таким образом, в условиях Беларуси основным направлением, ведущим к повышению конкурентоспособности продукции легкой промышленности, является снижение энергозатрат прежде всего за счет повышения энергоэффективности технологических процессов. Последнее требует получения объективной оценки, что возможно лишь при проведении термодинамического анализа, который наиболее компактно реализуется на базе эксергетического метода. Применение последнего осложняется трудностями нахождения эксергии тех или иных веществ, количество которых велико и связано с многообразием систем преобразования вещества. Для текстильной промышленности Беларуси обозначенная проблема актуальна в связи с необходимостью получения объективной оценки и дальнейшего совершенствования энергообеспечения теплотехнологии отделочных производств. Наиболее актуальны для текстильной промышленности натуральные (лен, хлопок, шелк, шерсть и др.) и искусственные (акрил, нейлон, полиэстер, полиамид и др.) материалы.

Описание методики расчета составляющих эксергии вещества. Эксергия вещества в потоке определяется тремя составляющими

$$e_{\text{матер}} = e_{r,\text{матер}} + e_{pT,\text{матер}} + e_{k,\text{матер}}, \quad (1)$$

где $e_{r,\text{матер}}$, $e_{k,\text{матер}}$, $e_{pT,\text{матер}}$, кДж/кг, – соответственно реакционная, концентрационная, термомеханическая составляющие удельной массовой эксергии вещества.

При этом удельную массовую эксергию будем относить к массе сухого неокрашенного материала, которым могут быть как пряжа, так и ткань. Состав материала предлагается определять на массу материала, из которого удалена вся свободная и связанная влага без гидратной (кристаллизационной) влаги, не удаляемой без разрушения химических связей в материале и самого материала [15]. В дальнейшем используется термин «сухой материал», под которым понимается материал с кристаллизационной (гидратной) влажностью.

Реакционная удельная массовая составляющая эксергии потока материала определяется соотношением

$$e_{r,\text{матер}} = \sum g_j e_{r,j}, \quad (2)$$

где g_j , доли, – массовые доли составляющих компонентов ткани или пряжи, отнесенные к массе сухого материала; $e_{r,j}$, кДж/кг, – реакционная удельная массовая эксергия j -го компонента материала.

В общем случае текстильный материал состоит из смеси неокрашенного сухого материала, равновесной конечной и начальной или промежуточной влаги в процессе тепловлажностной обработки, красителя и текстильных вспомогательных веществ и химических реагентов в промежуточных состояниях в ходе обработки.

Реакционные составляющие эксергии компонентов $e_{r,j}$ определяются по справочной литературе [16] либо рассчитываются по реакции девальвации [17, 18]. В случае горючих компонентов возможно рассматривать последние как топливо и использовать методику, предложенную Шаргуттом для расчета реакционной составляющей эксергии твердых топлив, твердых углеводородных соединений, базирующуюся на использовании удельной массовой высшей теплоты сгорания Q_B^p , кДж/кг [17]. Для твердых органических веществ методика модифицируется к соотношению [17, 19, 20]

$$e_{r,\text{матер}} = (Q_B^p + rW)\alpha, \quad (3)$$

где r , кДж/кг, – удельная массовая теплота парообразования воды при атмосферном давлении; W , доли, – влажность компонента на его общую массу; $\alpha = 1,0438 + 0,0159 g_H/g_C + 0,0813 g_O/g_C$ – корреляционная поправка для твердых углеводородов с соединениями С, Н, О при условии, что $g_O/g_C \leq 0,5$; или для соединений, содержащих С, Н, О, N, формула примет вид: $\alpha = 1,0447 + 0,0140 g_H/g_C + 0,0968 g_O/g_C + 0,0467 g_N/g_C$ при условии, что $g_O/g_C \leq 0,5$; g_H , g_C , g_O , g_N – соответственно массовые доли в материале водорода, углерода, кислорода и азота.

Например, для хлопка и нейлона получаем удельную массовую реакционную составляющую эксергии соответственно 17,9 и 33,9 МДж/кг. Следует понимать, что данная составляющая эксергии вещества принципиально не может быть определена точно, и погрешность в 1 % в приведенной записи нужно считать минимально возможной.

Теплоту сгорания в (3) при отсутствии справочных данных можно рассчитывать по известному соотношению Д. И. Менделеева, дающему более точный результат, чем соответствующее соотношение Дюлонга [21, 22]:

$$Q_H^p = 81C + 246H - 26(O - S) - 6W, \quad (4)$$

где Q_H^p , ккал/кг, – удельная массовая низшая теплота сгорания материала; С, Н, О, S, W – соответственно процентное содержание в топливе углерода, водорода, кислорода, горючей серы и влаги.

Концентрационная составляющая эксергии текстильных материалов относится лишь к тем, состав которых можно рассматривать в данном контексте как твердый раствор [17] и их разделение на компоненты связано с понятием термодинамической работы, не зависящей от давления, температуры материала и влажности окружающей среды [23]. Последнее связывает концентрационную составляющую эксергии рассматриваемых материалов с энергией адсорбции красителя на материале [24]. В случае влажного материала концентрационная составляющая связана также с энергией связи кристаллизационной (гидратной) влажности материала [25–27]. Тогда можно предложить следующую зависимость для расчета концентрационной составляющей эксергии текстильных материалов:

$$e_{\text{к,матер}} = \sum_1^{n-1} (g_j w_j), \quad (5)$$

где n – число компонентов материала (материал, влага, краситель и пр.); g_j , доли, – массовая доля компонентов материала на сухую массу (для воды g_j – гидратная влажность материала); w_j , кДж/кг, – удельная энергия адсорбции красителя материалом или энергии химической связи гидратной влаги с материалом [27].

Энергия адсорбционного взаимодействия может быть взята из соответствующих справочников [28, 29]. Энергия адсорбции для наиболее характерных пар «сорбент – сорбат» приведена в табл. 1. Значения энергии сорбции из табл. 1 имеются в [29–33] по крашению и обработке текстильных и трикотажных материалов с учетом влияния основных химических реагентов – электролитов (NaCl и NaOH) – и текстильно-вспомогательных веществ, к которым относятся поверхностно-активные вещества (ПАВ). И те и другие не связаны с концентрационной составляющей эксергии, поскольку вымываются из материала без затрат термодинамической работы.

Таблица 1

Энергия сорбции некоторых взаимодействий текстильных материалов и красителей [32, 33]

Наименование красителя	Энергия сорбции красителя, кДж/моль	Молярная масса красителя, г/моль	Энергия сорбции красителя, кДж/кг
Прямые красители для натуральных целлюлозных волокон			
Chrysophenine G (Yellow 12)	59	680,7	86,7
Durazol Fast Yellow 6g	130	485,5	267,8
Chlorazol Fast Scarlet 8B	84	902,8	93,0
Chlorazol Sky Blue FF	92	992,0	92,7
Кислотные красители для искусственных волокон и волокон животного происхождения			
Metanil Yellow YK (Acid Yellow 36)	38,2	375,4	101,8
Quinizarine Blue (Acid Violet 43)	38,2	240,21	159,0
Дисперсные красители для крашения гидрофобных волокон (полиэфирных, полиамидных и ацетатных)			
P-nitroaniline	85,4	138,7	615,9
Azobenzene	69,9	171,2	408,2
P-aminoazobenzene	99,2	182,2	544,4

Термомеханическая составляющая эксергии потока рассматриваемого материала определяется соотношением

$$e_{pT, \text{матер}} = \sum (g_j ((i_j - i_{j,0}) - T_0 (s_j - s_{j,0}) + l_j)), \quad (6)$$

где g_j , доли, – массовые доли составляющих компонентов ткани или пряжи, отнесенные к массе сухого материала в соответствии с соотношением (2); i_j , $i_{j,0}$, кДж/кг, – энтальпия компонентов вещества удельная массовая; T_0 , К, – температура окружающей среды; s_j , $s_{j,0}$, кДж/(кг·К), – энтропия компонентов вещества удельная массовая; l_j , кДж/кг, – энергия отрыва компонента от материала, удельная массовая на килограмм компонента. Определяется с учетом каждого вида связи влаги с материалом [17, 23, 26, 27, 34].

Для численного расчета энергии отрыва влажной компоненты можно использовать методику Ребиндера [15, 27]

$$l_j = \sum_1^m l_k y_k, \quad (7)$$

где m – количество видов влаги в материале за исключением гидратной составляющей: адсорбционно-связанная, осмотически связанная, капиллярно-связанная влага; l_k , кДж/кг, – энергия связи каждого вида связи влаги в материале; y_k , доли, – массовая доля каждого вида влаги в материале по отношению к влаге материала.

В расчетах температура готового материала может изменяться в интервале до $t_{\text{матер, max}} = 80\text{--}120$ °С в зависимости от типа волокна. Температуру окружающей среды можно принимать $t_0 = 20$ °С. Для расчета значений $i_j - i_{j,0}$, $s_j - s_{j,0}$ следует использовать соотношение

$$(i_j - i_{j,0}) - T_0 (s_j - s_{j,0}) = \bar{c}_{p,j} \Big|_{t_0}^{t_{\text{матер}}} (t_{\text{матер}} - t_0) - T_0 \ln(T_{\text{матер}} / T_0), \quad (8)$$

где $\bar{c}_{p,j} \Big|_{t_0}^{t_{\text{матер}}}$ – удельная массовая изобарная средняя теплоемкость компонентов вещества в интервале температур $t_0 - t_{\text{матер}}$, кДж/(кг·К); T_0 , $T_{\text{матер}}$, t_0 , $t_{\text{матер}}$ – соответственно температуры окружающей среды, К, и материала, °С [17, 23, 34].

Удельная массовая изобарная средняя теплоемкость материала в интервале температур $t_0 - t_{\text{матер, max}}$ изменяется при изменении температур (в расчетах следует принимать среднюю интегральную) незначительно и в расчетах в пределах допустимой погрешности может быть принята постоянной величиной [30, 31]. Указанные значения удельной массовой изобарной теплоемкости наиболее часто встречающихся текстильных материалов в отделочном производстве приведены в табл. 2 [30–33, 35].

Таблица 2
Удельные массовые изобарные
теплоемкости некоторых
текстильных материалов

Название	Теплоемкость, кДж/(кг·°С)
Хлопок	1,34
Шерсть	1,38
Шелк	1,38
Полиэстер	0,84
Нейлон	2,09
Полиамид	1,13

Результаты анализа структуры эксергии вещества текстильных и трикотажных материалов приведем на примере характерных текстильных материалов, которыми являются хлопок как представитель натуральных целлюлозных материалов и нейлон – наиболее распространенный искусственный материал. Для хлопка принимаем основной краситель, например Chrysophenine G или Yellow 12, ($C_{30}H_{26}N_4Na_2O_8S_2$, табл. 1), для нейлона – дисперсный краситель – азобензол ($C_{12}H_{10}N_2$).

Реакционную составляющую эксергии рассматриваемых материалов находим расчетным путем по (2), используя соотношение (3). Получаем следующие значения реакционной составляющей эксергии красителей: для Chrysophenine G – 22,6 МДж/кг, азобензола – 34,5 МДж/кг. Используемая методика дает значения, совпадающие с данными таблиц [16] для известных органических соединений, таких как анилин C_6H_7N , $C_6H_{12}O$ и пр. В итоге получаем следующее значение реакционной составляющей эксергии окрашенных хлопка и нейлона выбранными красителями: соответственно 18,1 и 34,9 МДж/кг. Погрешность, связанная с неопределенностью величины адсорбции (40–80 %), не превышает 1 %. Поскольку определение реакционной составляющей принципиально не может быть точным [18], полученные значения могут использоваться в проведении эксергетического анализа. В указанных значениях реакционной составляющей эксергии окрашенных материалов вклад основного материала составляет: для хлопка – 98,9 %, для нейлона – 96,9 %. Таким образом, определяющим является нахождение реакционной составляющей основного материала.

Концентрационная составляющая находится из (5), данных табл. 1 и приведенных долей компонентов окрашенного материала (табл. 3).

Таблица 3

Состав окрашенного материала на сухую массу

Материал	Процент компонента в окрашенном материале	
	Хлопок	Нейлон
Основной материал	100	100
Влага, в том числе гидратная	8 <0,01	4 <0,01
Краситель	0,6–1,2	2,1–4,2

Энергия химической связи влаги находится в диапазоне от 1 до 10^7 кДж/кмоль [25]. Максимальная величина рассматриваемой составляющей не превышает 0,06 кДж/кг. С учетом количества гидратной влаги в материале вклад ее в концентрационную составляющую эксергии и в конечном итоге эксергию вещества оказывается меньшим погрешности исходных данных и расчетов, поэтому этой компонентой концентрационной составляющей можно пренебречь. Кроме того, данная составляющая оказывается транзитной, что при использовании соответствующей методики оценки термодинамической эффективности автоматически исключается из результата.

Получаем следующие результаты концентрационной составляющей эксергии для окрашенных: хлопка $e_{к,хл} = 0,52–1,04$ кДж/кг, нейлона

$e_{к,н} = 8,50-17,0$ кДж/кг в зависимости от доли красителя в окрашенном материале.

Термомеханическую составляющую рассчитываем для параметров: температура 40 °С, давление атмосферное. Параметры окружающей среды: температура 20 °С, давление атмосферное 745 мм рт. ст., влажность относительная 70 %. Теплоемкости материалов приведены в табл. 1. Для красителя нейлона удельную массовую изобарную теплоемкость для азобензола находим в справочнике Б. П. Никольского [36]; она равна $0,330$ ккал/(кг·°С) = $1,38$ кДж/(кг·°С). В отношении Yellow 12, используемого в роли красителя хлопка, ситуация менее определенная. Поскольку данный краситель не включен в известные справочные материалы, можно применить следующее решение.

Диапазон изменения массовой доли красителя в целлюлозных натуральных материалах можно рассчитать исходя из доли адсорбции красителя волокнами из раствора 40–80 % [37, 38] и рецептов расхода красителей. Тогда содержание рассматриваемого красителя в хлопковом материале составляет 6–12 г на килограмм сухого материала, или 0,6–1,2 % [39, 40]. Теплоемкость красителей данной группы находится на уровне $2,0$ кДж/(кг·°С), а погрешность в этом случае составляет 50 %. При теплоемкости хлопка $1,34$ кДж/(кг·°С) получаем диапазон изменения теплоемкости окрашенного материала $1,98-2,00$ кДж/(кг·°С). Таким образом, погрешность составляет до 1 % и не превышает погрешности определения основного материала – хлопка. Это отвечает требованиям расчета эксергии для рассматриваемого случая анализа работы установок.

Энергия отрыва влаги в материале изменяется для того или иного вида связи и находится в пределах 11–152 кДж/кг для капиллярной составляющей влаги в зависимости от температуры и эквивалентного диаметра капилляра [27]. Количеством капиллярной влаги в большинстве случаев (при малых и умеренных значениях относительной влажности окружающей среды) можно пренебречь и считать, что процесс лежит в сугубо адсорбционной области [27]. Таким образом, в расчетах принимаем энергию связи влаги в материале, равной адсорбционной составляющей, и находим ее в справочных данных [15, 25, 27]. В рассматриваемом примере для хлопка энергия отрыва адсорбционной влаги в материале составит $24,457$ кДж/кг, для нейлона $24,452$ кДж/кг, т. е. изменение величины энергии отрыва для различных видов тканей и пряжи не превышает погрешности определения. С учетом массовой доли влаги, отнесенной к массе сухого материала, величина данного компонента в термомеханической составляющей эксергии материала составит $1,96$ кДж/кг для хлопка и $0,98$ кДж/кг для нейлона соответственно.

С учетом изложенного находим термомеханическую составляющую эксергии окрашенных хлопка и нейлона указанными красителями. Для хлопка она составит $3,25-3,26$ кДж/(кг·°С) в зависимости от доли красителя в пределах указанного диапазона адсорбции 40–80 %. Для нейлона, окрашенного азобензолом, получаем с учетом рецептурного расхода красителя 52 г/кг и изменения величины адсорбции в диапазоне 40–80 % значение

термомеханической составляющей 2,77–2,81 кДж/(кг·°С). Таким образом, значения эксергии составят:

- для окрашенного хлопка

$$e_{\text{хл}} = e_{r,\text{матер}} + e_{pT,\text{матер}} + e_{k,\text{матер}} = 18,1 \cdot 10^3 + 3,26 + 1,04 = 18,1 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг};$$

- для окрашенного нейлона

$$e_{\text{н}} = e_{r,\text{матер}} + e_{pT,\text{матер}} + e_{k,\text{матер}} = 34,9 \cdot 10^3 + 2,81 + 17,0 = 34,9 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}.$$

Из полученных результатов следует, что доминирующей составляющей, на 2–4 порядка превышающей прочие слагаемые эксергии текстильных окрашенных материалов, является реакционная составляющая. Она остается транзитной при проведении технологических операций в рассматриваемых системах, и в этой связи следует исключить ее влияние на оценку энергетической эффективности процесса (рис. 1) [41].

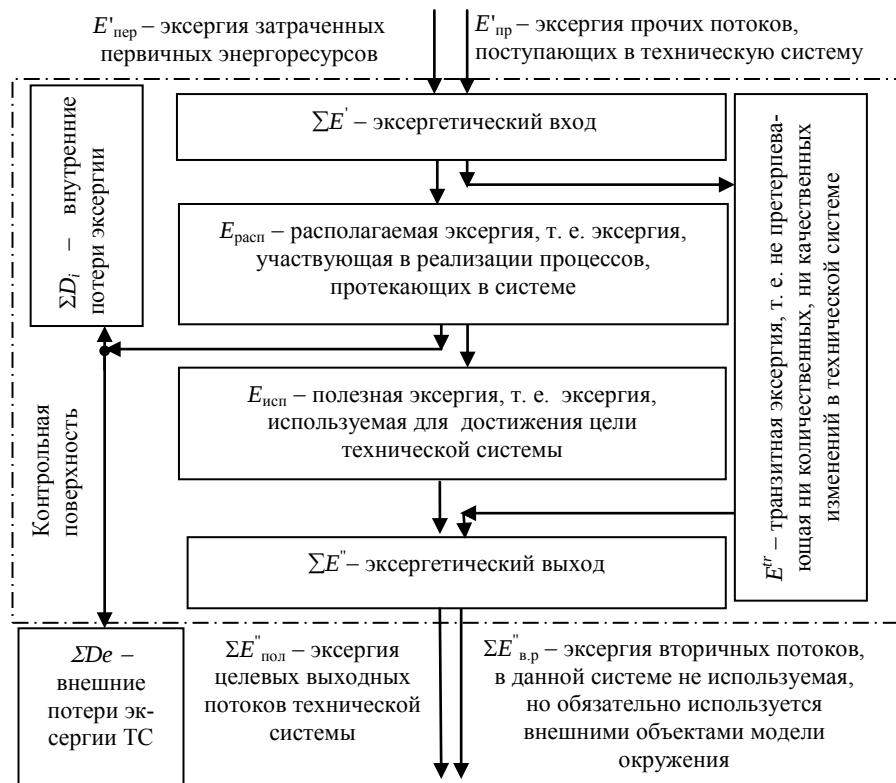


Рис. 1. Схема эксергетических потоков технической системы

Результаты будут иметь невысокую наглядность, если структурой эксергии вещества в потоке для текстильных и трикотажных материалов пренебречь и использовать оценку с помощью степени термодинамического совершенства технической системы:

$$\nu = \Sigma E'' / E' = 1 - \Sigma D / \Sigma E'. \quad (9)$$

Для получения требуемой информативности целесообразно использовать оценку, например, с помощью термодинамического КПД

$$\eta_e = (\sum E'' - E^{tr}) / (\sum E' - E^{tr}) = 1 - \sum D / (\sum E' - E^{tr}) = E_{исп} / E_{расп}, \quad (10)$$

в совокупности со степенью технологического совершенства

$$\beta = \sum E_{расп} / E' = 1 - \sum E^{tr} / \sum E', \quad (11)$$

либо степенью полного совершенства технической системы [20]

$$\mu = \sum E_{исп} / E' = 1 - (\sum E^{tr} + \sum D) / \sum E'. \quad (12)$$

Составляющие формул (9)–(11) пояснены на рис. 1.

Концентрационная составляющая эксергии вещества в потоке для рассматриваемых материалов наименее значима, ее величина на два порядка уступает ближайшей по значению термомеханической составляющей. Это позволяет определять концентрационную составляющую эксергии рассматриваемых веществ приближенно, поскольку погрешность нахождения данной составляющей не должна оказать влияния на конечную оценку при должном выборе алгоритмов проведения расчетов. В некоторых случаях, видимо, будет допустимо исключить концентрационную составляющую данных материалов из анализа технических систем, считая ее неизменной и транзитной.

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ структуры эксергии наиболее распространенных текстильных материалов.
2. Выявлена большая разность значений составляющих эксергии вещества в потоке для текстильных и трикотажных материалов, что предполагает использование эксергетической оценки технических систем с использованием понятий транзитной эксергии.
3. Предлагается методика расчета эксергии текстильных и трикотажных материалов, которую можно применить для термодинамического анализа теплотехнологий легкой промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. С а в к о, С. Правительство одобрило Национальную стратегию социально-экономического развития Беларуси до 2030 г. [Электронный ресурс] / С. Савко // Новости Беларуси. БЕЛТА. – Режим доступа: http://www.belta.by/ru/all_news/society/Pravitelstvo-odobrilo-Natsionalnuju-strategiju-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitija-Belarusi-do-2030-goda_i_694751.html. – Дата доступа: 11.02.2015.
2. К а к о й будет Беларусь в 2030 г.? [Электронный ресурс] // Новости Беларуси. БЕЛТА. – Режим доступа: http://www.belta.by/ru/all_news/economics/Kakoj-budet-Belarus-v-2030-godu_i_687128.html. – Дата доступа: 11.02.2015.
3. П р о р о к о в, Н. «Пределы роста»: мир приближается к коллапсу [Электронный ресурс] // Theory&Practice. – Режим доступа: <http://theoryandpractice.ru/posts/9566-predely-rosta>. – Дата доступа: 11.09.2014.
4. М е д о у з, Донелла. Пределы роста. 30 лет спустя / Донелла Медоуз, Й. Рандерс, Деннис Медоуз. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 342 с.
5. О б и т о г а х социально-экономического развития отрасли за 2012 г. и поставленных задачах перед концерном «Беллепром» на 2013 г. [Электронный ресурс] // Белле-

пром. – Режим доступа: <http://www.bellegprom.by/print/press/news/ed8bd62b6fbba0c.html>. – Дата доступа: 01.10.2014.

6. К о м п л е к с н а я программа развития легкой промышленности Республики Беларусь на 2011–2015 гг. с перспективой до 2020 г. [Электронный ресурс] // Беллегпром. – Режим доступа: <http://www.bellegprom.by/programs>. – Дата доступа: 02.10.2013.

7. Т е з и с ы выступления министра иностранных дел Республики Беларусь М. М. Хвостова на Междунар. конф. «Белорусский инвестиционный форум» «Состояние и перспективные направления внешнеэкономических связей Республики Беларусь» [Электронный ресурс] // Министерство иностранных дел Респ. Беларусь. – Режим доступа: http://mfa.gov.by/print/press/news_mfa/c51bef227efc2784.html. – Дата доступа: 12.02.2015.

8. А л е к с а н д р Л у к а ш е н к о дал интервью журналу «Туркменистан» (Подробности) [Электронный ресурс] // Общенациональное телевидение. Государство. Новости. – Режим доступа: http://ont.by/news/our_news/00122740. – Дата доступа: 10.02.2015.

9. Г р и ш к е в и ч, А. Лукашенко: локомотивом белорусской экономики в ближайшие годы должны стать наукоемкие отрасли [Электронный ресурс] / А. Гришкевич // Новости Беларуси. БЕЛТА. – Режим доступа: http://www.belta.by/ru/all_news/president/Lukashenko-lokomotivom-belorusskoj-ekonomiki-v-blizhajshie-gody-dolzny-stat-naukoemkie-otrasli_i_692448.html. – Дата доступа: 09.02.2015.

10. П о с е щ е н и е торгово-развлекательного центра «Экспобел» 17 марта 2015 г. [Электронный ресурс] // Президент Республики Беларусь. Официальный интернет-портал Президента Республики Беларусь. – Режим доступа: http://president.gov.by/ru/news_ru/view/poseschenie-torgovo-razvlekatelnogo-tsentra-ekspobel-11019/. – Дата доступа: 18.03.2015.

11. Д о к л а д Президента Республики Беларусь Александра Лукашенко на четвертом Всебелорусском народном собрании [Электронный ресурс] // Новополоцк, официальный сайт. – Режим доступа: <http://www.novopolotsk.by/content/view/3139/176/>. – Дата доступа: 15.02.2015.

12. «М о г о т е к с» планирует направить на модернизацию производства 4,5–5 млн евро [Электронный ресурс] // Развіццё прамысловасці. – Режим доступа: <http://www.skyscraper.city.com/showthread.php?t=1520139>. – Дата доступа: 13.02.2015.

13. В к а р е т е прошлого далеко не уедешь [Электронный ресурс] // СБ Беларусь сегодня. – Режим доступа: <http://www.sb.by/peredovitsa/article/v-karete-proshlogo-daleko-ne-uedesh-2.html>. – Дата доступа: 12.02.2015.

14. С т р а т е г и я развития легкой промышленности России на период до 2020 г. [Электронный ресурс] // Минпромторг России. – Режим доступа: <http://www.minpromtorg.gov.ru/ministry/strategic/sectoral/3>. – Дата доступа: 15.10.2012.

15. Л ы к о в, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.

16. С т е п а н о в, В. С. Химическая энергия и эксергия веществ / В. С. Степанов. – Новосибирск: Наука, 1985. – 100 с.

17. Ш а р г у т, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. – М.: Энергия, 1968. – 280 с.

18. Б р о д я н с к и й, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.

19. С а ж и н, Б. С. Эксергетический метод в химической технологии / Б. С. Сажин, А. П. Булеков. – М.: Химия, 1992. – 208 с.

20. С а ж и н, Б. С. Эксергетический анализ работы промышленных установок / Б. С. Сажин, А. П. Булеков, В. Б. Сажин; под ред. Б. С. Сажина. – М.: МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2000. – 297 с.

21. Х и м и я и химическая технология [Электронный ресурс] // Справочник химика 21. – Режим доступа: <http://chem21.info/page/049043014037203196159079062249018161008032117027/>. – Дата доступа: 12.01.2015.

22. Р а в и ч, М. Б. Упрощенная методика теплотехнических расчетов / М. Б. Равич. – М.: Изд-во АН СССР, 1966. – 407 с.

23. Б р о д я н с к и й, В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек; под ред. В. М. Бродянского. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 288 с.

24. Ш е й х е т, Ф. И. Материаловедение химикатов, красителей и моющих средств / Ф. И. Шейхет. – М.: Легкая индустрия, 1969. – 324 с.

25. К и с е л е в а, Т. Ф. Технология сушки: учеб.-метод. комплекс / Т. Ф. Киселева. – Кемерово: Кемеровский технол. ин-т пищевой пром., 2007. – 117 с.

26. С а ж и н, Б. С. Основы техники сушки / Б. С. Сажин. – М.: Химия, 1984. – 320 с.
27. Н и к и т и н а, Л. М. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах / Л. М. Никитина. – М.: Энергия, 1968. – 499 с.
28. C h o u d h u r y, A. K. Roy. Textile Preparation and Dyeing/ A. K. Roy Choudhury. – Enfield, NH [u.-a.]: Science Publishers, 2006. – 834 p.
29. L e w i s, D. M. The Coloration of Wool and Other Keratin Fibres / D. M. Lewis, J. A. Rippon. – Bradford: Wiley, 2013. – 439 p.
30. К у л е з н е в, В. Н. Химия и физика полимеров: учеб. для химико-технолог. специальностей вузов / В. Н. Кулезнев, А. В. Шершнев. – М.: Высш. шк., 1988. – 312 с.
31. У с м о н к у л о в, А. К. Экспериментальные исследования теплоемкости хлопка-сырца и его компонентов / А. К. Усмонкулов, О. Н. Алимов, М. М. Очилов; под ред. А. К. Усмонкулова // Молодой ученый. – 2013. – № 1. – С. 23–25.
32. D u f f, D. Giles's Laboratory Course in Dyeing / D. Duff, R. Sinclair. – 4th ed. – Bradford: Society of Dyers and Colourists, 1989. – 167 p.
33. A C o m p r e h e n s i v e List of Some Common Solids as Brick, Cement, Glass and Many More – and Their Specific Heats – Imperial and SI Units [Electronic Resource] // The Engineering ToolBox. Mode of Access: http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html. – Date of Access: 04.01.2006.
34. D i n c e r, I. Exergy, Second Edition: Energy, Environment and Sustainable Development / I. Dincer, M. A. Rosen / 2nd. ed. – Elsevier Science, 2012. – 576 p.
35. П л о т н о с т ь, теплопроводность, теплоемкость строительных, теплоизоляционных и других материалов // Thermalinfo.ru – Теплопроводность, теплоемкость, плотность, вязкость, температуропроводность и другие свойства веществ в таблицах [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: http://thermalinfo.ru/publ/tverdye_veshhestva/stroitelnye_materialy/plotnost_teploprovodnost_teploemkost_stroitelnyh_materialov/6-1-0-2. – Дата доступа: 12.08.2012.
36. С п р а в о ч н и к химика / Б. П. Никольский [и др.]; под общ. ред. Б. П. Никольского // База данных: свойства веществ: термодинамика: теплоемкости веществ [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: http://www.chemway.ru/bd_chem/tbl_term_cp/w_tbl_term_cp_3.php. – Дата доступа: 16.07.2014.
37. П е т у х о в, Б. В. Полиэфирные волокна / Б. В. Петухов. – М.: Химия, 1976. – 272 с.
38. В о р о н ц о в, И. И. Производство органических красителей / И. И. Воронцов. – М.: Госхимиздат, 1962. – 554 с.
39. М е л ь н и к о в, Б. Н. Применение красителей: учеб. для вузов / Б. Н. Мельников, Г. И. Виноградова. – М.: Химия, 1986. – 240 с.
40. S c h o n b e r g e r, H. Best Available Techniques in Textile Industry [Electronic Resource] / H. Schonberger, T. Schafer // Berlin: Federal Environmental Agency Umweltbundesamt). – Mode of Access: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/best-available-techniques-in-textile-industry>. – Date of Access: 05.06.2014.
41. Р о м а н ю к, В. Н. Интенсивное энергосбережение в теплотехнологических системах промышленного производства строительных материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.04 / В. Н. Романюк. – Минск: БНТУ, 2010. – 365 с.

Представлена кафедрой ПТЭ и ТТ

Поступила 20.03.2015

R E F E R E N C E S

1. S a v k o, S. (2015) The Government Approves the National Strategy of the Socioeconomic Development of Belarus till 2030. *News of Belarus. BELTA*. Available at: http://www.belta.by/ru/all_news/society/Pravitelstvo-odobrilo-Natsionalnuju-strategiju-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiya-Belarusi-do-2030-goda_i_694751.html. (Accessed 11 February 2015) (in Russian).
2. W h a t Will Belarus be Like in 2030? *News of Belarus. BELTA*. 2015. – Available at: http://www.belta.by/ru/all_news/economics/Kakoj-budet-Belarus-v-2030-godu_i_687128.html. (Accessed 11 February 2015) (in Russian).
3. P r o r o k o v, N. (2014) “Growth Limits”: the World Approaches the Collapse. *Theory&Practice*. Available at: <http://theoryandpractice.ru/posts/9566-predely-rosta>. (Accessed 11 September 2014) (in Russian).
4. M e d o u z, Donella, Randers, Y., & Medouz, Dennis (2007) *Growth Limits. 30 Years Later*. Moscow, Academkniga Publ. 342 p. (in Russian).

5. On the Results of Socioeconomic Development of the Industry in 2012 and the Objectives Assigned Before the Concern Bellegprom for 2013. *Bellegprom*. Available at: <http://www.bellegprom.by/print/press/news/ed8bd62b6fbbba0c.html> (Accessed 1 October 2014) (in Russian).
6. The Complex Program of Development for the Light Industry of the Republic of Belarus in 2011–2015 with a Perspective to 2020. *Bellegprom*. Available at: <http://www.bellegprom.by/programs> (Accessed 2 October 2013) (in Russian).
7. The Theses of the Speech of Mr. Khvostov M. M., the Minister of Foreign Affairs of the Republic of Belarus at the International Conference “Belorussian Investment Forum” “The State and Perspective Directions of the External Economic Relations of the Republic of Belarus.” *The Ministry of Foreign Affairs of the Republic of Belarus*. Available at: http://mfa.gov.by/print/press/news_mfa/c51bef227efc2784.html (Accessed 12 February 2015) (in Russian).
8. Alexander Lukashenko Gives an Interview for the “Turkmenistan” Magazine (Details). *Nationwide Television. The State. News*. Available at: http://ont.by/news/our_news/00122740 (Accessed 10 February 2015) (in Russian).
9. Grishkevich, A. (2015) Lukashenko: the Knowledge-Intensive Industries are to Become the Locomotive for the Belorussian Economy in the Next Few Years. *Belarus News. BELTA*. Available at: http://www.belta.by/ru/all_news/president/Lukashenko-lokomotivom-belorusskoj-ekonomiki-v-blizhajshie-gody-dolzny-stat-naukoemkie-otrasli_i_692448.html (Accessed 9 February 2015) (in Russian).
10. Visiting the Trade and Recreation Center “Ekspobel” on March 17th 2015. *The President of the Republic of Belarus. The Official Internet-Portal of the President of the Republic of Belarus*. Available at: http://president.gov.by/ru/news_ru/view/poseschenie-torgovo-razvlekatelnogo-tsentra-ekspobel-11019/ (Accessed 18 March 2015) (in Russian).
11. The Report of the President of the Republic of Belarus at the Fourth All-Belorussian Popular Assembly. *Novopolotsk Official Site*. Available at: <http://www.novopolotsk.by/content/view/3139/176/> (Accessed 15 February 2015) (in Russian).
12. “Mogotex” is Planning to Direct 4,5–5 Mio EUR for Production Modernization. *Industry Development*. Available at: <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=1520139> (Accessed 13 February 2015) (in Russian).
13. The Yesteryear Carriage Will Not Drive Too Far. *SB. Belarus Today*. Available at: <http://www.sb.by/peredovitsa/article/v-karete-proshlogo-daleko-ne-uedesh-2.html> (Accessed 12 February 2015) (in Russian).
14. The Development Strategy of the Light Industry of Russia for the Period Till 2020. *Minpromtorg of Russia*. Available at: <http://www.minpromtorg.gov.ru/ministry/strategic/sectoral/3> (Accessed 15 October 2012) (in Russian).
15. Lykov, A. V. (1968) *The Theory of Drying*. Moscow, Energia. 472 p. (in Russian).
16. Stepanov, V. S. (1985) *Chemical Energy and Exergy of the Substances*. Novosibirsk, Nauka Publ. 100 p. (in Russian).
17. Shargut, Ya., & Petela, R. (1968) *Exergy*. Moscow, Energia. 280 p. (in Russian).
18. Brodyskiy, V. M. (1973) *Exergy Method of the Thermodynamic Analysis*. Moscow, Energia. 296 p. (in Russian).
19. Sazhin, B. S., & Bulekov, A. P. (1992) *Exergy Method in Chemical Technology*. Moscow, Chemistry. 208 p. (in Russian).
20. Sazhin, B. S., Bulekov, A. P., & Sazhin, V. B. (2000) *Exergy Analysis of the Production Units Operation*. Moscow: Bauman MSTU Publ. 297 p. (in Russian).
21. Chemistry and Chemical Technology. *Chemist Reference Book 21*. Available at: <http://chem21.info/page/049043014037203196159079062249018161008032117027/> (Accessed 12 January 2015) (in Russian).
22. Ravich, M. B. (1966) *Simplified Technique of Thermotechnical Calculations*. Moscow, Publishing house of AS USSR. 407 p. (in Russian).
23. Brodyskiy, V. M., Fratsher, V., & Mikhalek, K. (1998) *Exergy Method and its Applications*. Moscow, Energoatomizdat. 288 p. (in Russian).
24. Sheikhet, F. I. (1969) *Materials Chemistry of Chemicals, Coloring Agents, and Washing Materials*. Moscow, Legkaia Industriia Publ. 324 p. (in Russian).
25. Kiseleva, T. F. (2007) *Technology of Drying: Teaching Materials*. Kemerovo: Kemerovo Technology Institut of Food-Manufacturing Industry. 117 p. (in Russian).
26. Sazhin, B. S. (1984) *Principles of Drying Technology*. Moscow, Chemistry. 320 p. (in Russian).

27. Nikitina, L. M. (1968) *Thermodynamic Parameters and Mass-Transfer Coefficients in Wet Materials*. Moscow, Energia Publ. 499 p. (in Russian).
28. Choudhury, A. K. Roy. (2006) *Textile Preparation and Dyeing*. Enfield, Science Publishers. 834 p.
29. Lewis, D. M., & Rippon, J. A. (2013) *The Coloration of Wool and Other Keratin Fibres*. Bradford, Wiley. 439 p.
30. Kuliznev, V. N., & Shershnev, A. V. (1988) *Chemistry and Physics of Polymers*. Moscow, Vysshaya shkola. 312 p. (in Russian).
31. Usmonkulov, A. K., Alimov, O. N., & Ochilov, M. M. (2013) Experimental Studies of Raw-Cotton Heat Capacity and of its Components. *Molodoi Uchenyi* [Young Scientist], 1, 23–25 (in Russian).
32. Duff, D., & Sinclair, R. (1989) *Giles's Laboratory Course in Dyeing*. 4th ed. Bradford, Society of Dyers and Colourists. 167 p.
33. A Comprehensive List of Some Common Solids as Brick, Cement, Glass and Many More – and Their Specific Heats – Imperial and SI Units. *The Engineering ToolBox*. Available at: http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html (Accessed 4 January 2006).
34. Dincer, I., & Rosen, M. A. (2012) *Exergy, Second Edition: Energy, Environment and Sustainable Development*. 2nd. ed. Elsevier Science. 576 p.
35. Density, Thermal Conductivity, Heat Capacity of Building, Heat-Insulating and Other Materials. *Thermalinfo.ru – Thermal Conductivity, Heat Capacity, Density, Viscosity, Temperature Conductivity and Other Properties of Substances in Tables*. Available at: http://thermalinfo.ru/publ/tverdye_veshchestva/stroitelnye_materialy/plotnost_teploprovodnost_teploemkost_stroitelnyh_materialov/6-1-0-2 (Accessed 12 August 2012) (in Russian).
36. Chemist Reference Book / B. P. Nikol'skiy [et al.]; edited by B. P. Nikol'skiy // Data Base: Properties of the Substances: Thermodynamics: Heat Capacity of the Substances [Electronic Resource]. – 2014. – Access mode: http://www.chemway.ru/bd_chem/tbl_term_cp/w_tbl_term_cp_3.php. – Access Date: 16.07.2014 (in Russian).
37. Petukhov, B. V. (1976) *Polyester Fibre*. Moscow, Chemistry. 272 p. (in Russian).
38. Vorontsov, I. I. (1962) *Production of Organic Colorants*. Moscow, Goskhimizdat Publ. 554 p. (in Russian).
39. Mel'nikov, B. N., & Vinogradova, G. I. (1986) *The Use of Colorants*. Moscow, Chemistry. 240 p. (in Russian)
40. Schönbeger, H., & Schafer, T. (2003) Best Available Techniques in Textile Industry. Berlin: Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt). Available at: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/best-available-techniques-in-textile-industry> (Accessed 5 June 2014).
41. Roman'yuk, V. N. (2010) *Intensivnoe Energoberezhenie v Teplotekhnologicheskikh Sistemakh Promyshlennogo Proizvodstva Stroitel'nykh Materialov*. Diss. Dokt. Tekhn. Nauk [Intensive Energy Saving in Heat-Technological Systems of Industrial Production of the Building Materials. Dr. tech. sci. diss.]. Minsk, BNTU. 365 p. (in Russian).

О СТОХАСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВОЛНОВОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МАЛОМ КОЛИЧЕСТВЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Докт. техн. наук, проф. ОСИПОВ С. Н.

ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.»

E-mail: up-niptis@rambler.ru

В технике и горном деле широкое применение нашли методы волнового просвечивания, основанные на использовании параметров отраженных и проходящих волн, полученных путем воздействия на твердые материалы и породы из различных источников. В последние годы широко распространилась простая методика робастного проектирования производственных процессов, в которой использованы понятия «сигнал» и «шум», а десятая часть величины логарифма обратного значения квадрата дисперсии соответствует отношению сигнала к шуму. В статье использована методика оценки доверительных пределов для дисперсии при робастном проектировании по критерию хи-квадрат при малой выборке, описанная К. А. Браунли под редакцией академика А. Н. Колмогорова, что существенно повышает надежность стохастических оценок.

Для примера количественной оценки надежности определения аномальных зон в шахтных условиях применена выкопировка из графиков формирования регулярных компонент поля упругих колебаний при сейсмическом просвечивании параллельно слоистости соляных пород нижней промышленной пачки III калийного горизонта Старобинского месторождения. Предлагаемая методика может использоваться при стохастической оценке результатов измерений любых процессов, где необходимо оценить надежность выделения сигнала на фоне шума. При этом удобно пользоваться простой условной шкалой, построенной на базе времени и величины уровня шума, принимаемых за единицу. Приведенные номограмма и графические зависимости позволяют быстро оценить вероятность реализации отношения сигнала к шуму и возможности ее повышения. При этом получаемые оценки мало зависят от формы распределения вероятных значений используемой величины.

Ключевые слова: твердые материалы, горные породы, аномальные зоны, волновое просвечивание, прямые волны, отраженные волны, сигнал, шум, дисперсия, коэффициент вариации, вероятность реализации, робастное проектирование.

Ил. 3. Табл. 1. Библиогр. 12 назв.

ON STOCHASTIC ESTIMATION OF THE RESULTS OF UNDULATORY TRANSILLUMINATION OF SOLID MATERIALS WITH A PAUCITY OF MEASUREMENTS

OSIPOV S. N.

UE "Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S."

The methods of undulatory transillumination found extensive application in engineering and mining practice. They are based on utilization of the parameters of reflected and transmitted waves produced by way of affecting solid materials and formations with diverse sources. In recent years a simplistic technique of the productive-process robust designing enjoys widespread occurrence. It uses notions of 'signal' and 'noise' and a tenth part of the logarithm value of the reciprocal magnitude of the dispersion squared value corresponds the ratio of the signal and the noise. The article utilizes the confidence boundaries evaluation techniques for dispersion in robust design on chi-square criterion at small sample specified by K. A. Brownly under editorial of academician A. N. Kholmogorov, which essentially increases reliability of the stochastic estimations.

Exemplarily of quantitative assessment in the reliability determination of anomalous zones in mining conditions, the author shows the tracing of a map of the formation graph of regular components of the elastic wave field at seismic transillumination along the layerage of the soliferous rocks of lower industrial pad III of potash horizon of the Starobinski mine-field. The article claims the feasibility of the offered technique for stochastic estimation of the measurement results of any process where it is necessary to evaluate the reliability of the signal extraction against the noise background. A simple conditional scale built on basis of time and noise level values taken as a unit is convenient to use. The presented alignment chart and graphical dependencies allow quickly appraise the realization probability of the signal-to-noise relation and possibility of its rise. Thereat the obtained evaluations depend little on the probable magnitudes distribution form of the employed value.

Keywords: solid materials, rock formations, anomalous zones, undulatory transillumination, direct waves, reflected waves, signal, noise, dispersion, variation coefficient, realization probability, robust design.

Fig. 3. Tab. 1. Ref. 12 titles.

Применение методов волнового просвечивания (МВП) твердых материалов, основанных на использовании отраженных и проходящих волн для обнаружения и изучения физически отличающихся зон, может быть отнесено к способам оценки стохастической надежности использования робастного метода определения аномальных зон в твердых материалах, в том числе горных породах, и определения необходимого превышения сигналом шума. Малое число измерений в математической статистике – до 30. Известны способы обнаружения и изучения геологических объектов, отличающихся от окружающих пород скоростями распространения упругих колебаний, поглощающими и рассеивающими свойствами [1, с. 206–244]. Например, для локального прогноза возможных очагов газодинамических явлений при разработке Старобинского месторождения калийных солей могут применяться радиоволновые, акустические и сейсмические методы, в которых используются понятия «сигнал» и «шум» [1, с. 244].

В последние годы широкое распространение получила методика робастного проектирования производственных процессов Г. Тагучи [2, 3]. В ней использованы понятия «сигнал» (управляемый фактор) и «шум» (неуправляемый, т. е. случайный фактор). Отношение сигнала (с) к шуму (ш), по Г. Тагучи, описывается выражением

$$\frac{с}{ш} = 10 \lg \left(\frac{\bar{x}^2}{\sigma^2} \right), \quad (1)$$

где $\bar{x}$ – средняя величина (центр рассеяния); σ – среднеквадратическое отклонение.

Эта зависимость использована в [4] для учета стохастической природы величины всей совокупности распределения, для чего из [5] брали значение стандартного отклонения σ без учета степени свободы параметра в виде $t/\sqrt{2n}$ (где n – количество измерений сигнала; t – количество среднеквадратических отклонений, соответствующее необходимой надежности определения при действующем распределении плотности вероятности). Недостатками учета такого стандартного отклонения являются его неточность и неправомерность применения при $n < 30$.

Известен Евразийский патент [6], в котором для определения необходимого количества измерений при $n < 30$ применяется критерий хи-квадрат (χ^2), что было предложено К. А. Браунли более 70 лет назад [7]. Недостаток этого способа – использование известного выражения для определения необходимого количества испытаний (измерений) при нормальном законе распределения случайных величин в качестве базовой. Это выражение по виду и смыслу существенно отличается от предложенного Г. Тагучи.

Технического результата можно достичь с помощью робастного метода определения аномальных зон в твердых материалах и горных породах путем нахождения необходимого превышения сигналом шума радиоволновыми, акустическими или сейсмическими методами с применением томографии, дающими количественную характеристику отношений сигнала к шуму. При этом среди набора волн выделяют исследуемый параметр, который принимают за сигнальный. Далее расчетным способом определяют расчетную кратность превышения сигнала к шуму и задают соответствующее ей значение стохастической надежности при малом количестве испытаний ($n \leq 30$).

Общепринятым показателем меры рассеяния стохастической величины вокруг среднего значения является коэффициент вариации K_v , величина которого определяется из выражения

$$K_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \left(\frac{\bar{x}}{\sigma} \right)^{-1}. \quad (2)$$

Для малых выборок ($n \leq 30$) К. А. Браунли [7, с. 48] предлагает использовать формулу для определения вероятного верхнего предела истинного значения дисперсии ϕ в виде

$$\phi = \frac{m}{\chi^2} \sigma^2, \quad (3)$$

где n – выборка (количество случаев или измерений) с $m = n - 1$ степенями свободы; χ^2 – критерий хи-квадрат.

Из формул (3) и (1) получаем:

$$\frac{c}{ш} = 10 \lg \left(K_v^2 \frac{n-1}{\chi^2} \right)^{-1}; \quad (4)$$

и

$$\lg \chi^2 = \lg(n-1) + 2 \lg K_v - \frac{1}{10} \frac{c}{ш}. \quad (5)$$

Согласно [7, с. 20], критерий χ^2 является функцией вероятности p и числа степеней свободы $m = n - 1$, т. е. объема выборки n . Поэтому для численного определения показателя надежности (вероятности реализации) необходимо по известным значениям n , K_v и $c/ш$ вычислить $\lg \chi^2$ и χ^2 , а затем по $\chi^2 = f(p, n)$ найти p .

Если обозначить:

$$A_1 = \frac{n-1}{\chi^2} \quad \text{и} \quad A_2 = \left(K_B^2 10^{\frac{c}{10\text{ш}}} \right)^{-1}, \quad (6)$$

то должно удовлетворяться равенство $A_1 = A_2$, но в явном виде решить это уравнение относительно вероятности реализации p и n не представляется возможным. Поэтому в данном случае самым простым способом численного решения данного уравнения является графоаналитический с использованием простой номограммы, которая приведена на рис. 1а, б.

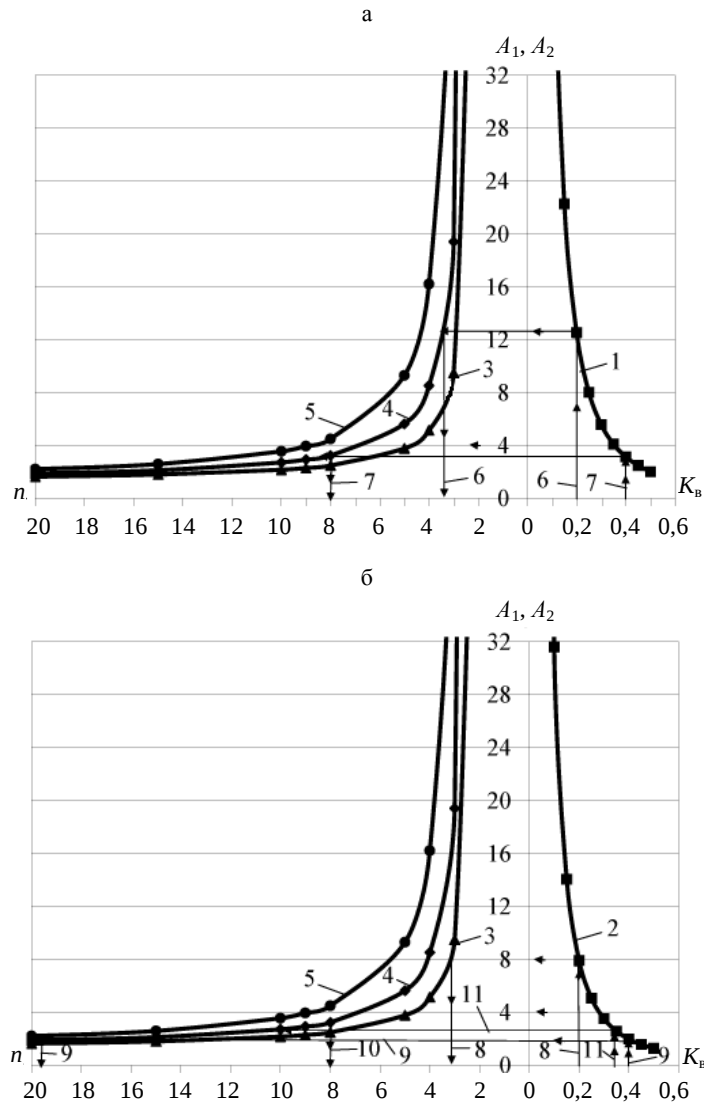


Рис. 1. Номограмма для определения значений вероятности реализации отношений $c/\text{ш}$: а – $c/\text{ш} = 3$; б – 5

На рис. 1 использованы следующие условные обозначения: 1, 2 – зависимости $A_2 = f(K_B, c/\text{ш})$ согласно (6) при $c/\text{ш} = 3$ и 5 соответственно;

3, 4, 5 – зависимости $A_1 = f(n, p)$ согласно (6) при $p = 0,90$; 0,95 и 0,98 соответственно; 6, 7 – линии для определения n при $c/\text{ш} = 3$ для $K_b = 0,2$ и 0,4 соответственно; 8, 9 – то же при $c/\text{ш} = 5$; 10, 11 – линии для определения надежности (вероятности) определения аномальной зоны при $n = 10$ и $K_b = 0,35$ соответственно.

Как следует из определений n по номограмме, приведенной на рис. 1, при $K_b = 0,2$ и $c/\text{ш} = 3n \approx 3,5$, а при $c/\text{ш} = 5n \approx 4,2$, т. е. количество необходимых измерений выросло на 20 %; при $K_b = 0,4$ и $c/\text{ш} = 3n \approx 8,5$, а при $c/\text{ш} = 5n \approx 19,5$, т. е. значение n увеличилось на 230 %, что очень значительно. Следует заметить, что полученные расчетные значения n следует округлять в большую сторону и в соответствии с рекомендацией [6] всегда принимать $n \geq 4$. На рис. 1 также приведен пример определения надежности при $n = 10$ и $K_b = 0,35$ (линии 10 и 11), составившей $p = 0,95$.

В связи с возможными большими значениями коэффициента вариации измеряемых параметров ($K_b \geq 0,5$) и его значительным влиянием на величину n (формула (6) для A_2) на рис. 2 приведены зависимости $n = f(K_b)$ при различных значениях n и $c/\text{ш}$. Здесь использованы следующие условные обозначения: 1, 2, 3 – зависимости $n = f(K_b)$ при $c/\text{ш} = 3$ и $p = 0,98$; 0,95 и 0,90 соответственно; 4, 5, 6 – зависимости $n = f(K_b)$ при $c/\text{ш} = 5$ и $p = 0,98$; 0,95 и 0,90 соответственно; 7, 8, 9 – предельные значения K_b , которые при $c/\text{ш} = 5$ и $n = 4$; 6 и 10 обеспечивают $p = 0,98$; 0,95 и 0,90 соответственно; 10, 11, 12 – то же при $c/\text{ш} = 3$ соответственно. Значения $n = 4, 6$ и 10 приняты в соответствии с рекомендациями, приведенными в [6, 8].

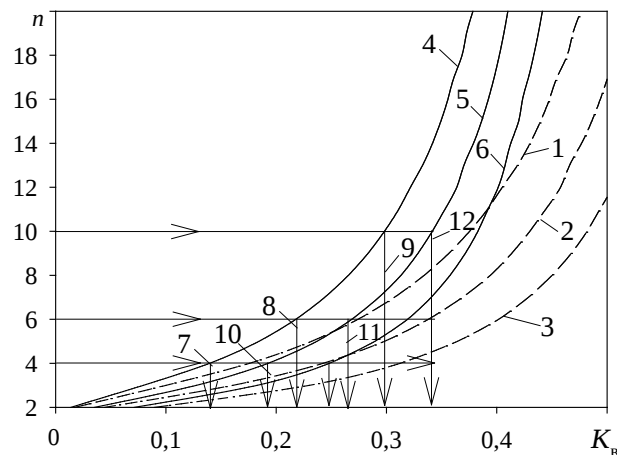


Рис. 2. Зависимость количества необходимых измерений от K_b

Так, в [6, 8] рекомендуется минимальное значение $n = 4$, а в [9, с. 13, п. 2.3.5] отмечено, что «количество образцов при массовых испытаниях должно обеспечить относительную погрешность результатов испытаний не более 30 % при надежности не ниже 0,8 и быть не менее 6», что подтверждается в п. 1.3.9 [9, с. 8], но при относительной погрешности результатов испытаний не более 20 % и надежности не ниже 0,8. В п. 1.3.10 [9, с. 8] отмечено: «Количество образцов при сравнительных испытаниях должно

обеспечивать относительную погрешность результатов их испытаний не более 10 % при надежности не ниже 0,95 и быть не менее 10».

Из графиков на рис. 2 видно, что при $c/\text{ш} = 5$ предельные значения K_b в случае $n = 4; 6$ и 10 при $p = 0,98$ соответственно равны $K_b = 0,19; 0,27$ и $0,35$. При $c/\text{ш} = 3$ диапазон использования результатов измерений с большим разбросом ($K_b > 0,20-0,25$) значительно расширяется, но при этом существенно возрастает относительная погрешность результатов испытаний. Также необходимо отметить существенное увеличение количества измерений при $K_b > 0,20-0,25$.

Для примера количественной оценки надежности определения аномальных зон в шахтных условиях использована выкопировка из графиков формирования регулярных компонент поля упругих колебаний при сейсмическом просвечивании параллельно слоистости соляных пород нижней промышленной пачки III калийного горизонта Старобинского месторождения, которые приведены в [1, с. 209]. Эта выкопировка представлена на рис. 3, где 1 – фоновый шум; 2 – прямая волна; 3 – объемно-преломленная волна; 4 – прямая поперечная волна; 5 – преломленная волна; 10, 11, 12 – сейсмические каналы, для которых сохранена нумерация оригинала [1, с. 209, рис. 6.1].

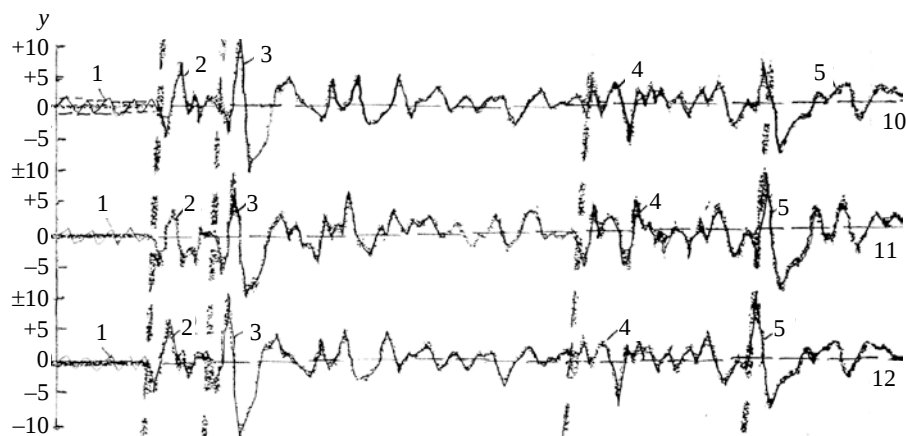


Рис. 3. Диаграмма оценки уровня шума

Учитывая отсутствие обозначений размерностей в этом оригинале для рис. 3 в качестве оценки уровня шума (линия 1) принята условная единица ± 1 , которая соответствует средним величинам максимальных (положительных и отрицательных) значений (пунктирные линии). Соответственно за величины сигнала приняты отношения значений пиков колебаний к условной величине шума ± 1 , также выраженные в условных единицах.

Отсутствие обозначений времени по горизонтальной оси в оригинале вынуждает на рис. 3 использовать условные единицы времени τ , отмеряемые от начала формирования (наклонные пунктирные линии) регулярных компонент поля упругих колебаний. В расчетах использованы показатели 10, 11 и 12-го каналов сейсмического просвечивания, графически приведенные в [1, с. 209, рис. 6.1], которые были отцифрованы для прямой и объемно-преломленной волн. Эти данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Прямая волна									
τ , у. е.	1,5	3,0	5,0	6,0	7,5	9,0	–	–	–
y_1	–5	+7	–1	+2	–2	+1	–	–	–
y_2	–5	+4	–4	–1	–3	+1	–	–	–
y_3	–4	+7	–1	+2	–2	+1	–	–	–
Объемно-преломленная волна									
τ , у. е.	2,5	5,0	11,0	16,0	19,0	21,0	24,0	27,0	31,0
y_1	+11	–10	+5	–2	+4	–2	+5	–3	+5
y_2	+10	–9	+3	0	+1	–3	+3	–3	+3
y_3	+11	–12	+3	–2	+2	–1	+5	–3	+3
τ , у. е.	34,0	38,0	41,0	44,0	46,0	50,0	52,0	58,0	60,0
y_1	–2	+3	–1	+1	0	+2	0	0	–1
y_2	0	+3	0	+1	–2	+3	–2	+3	0
y_3	–2	+2	–2	+1	–2	+1	–3	+2	–1

Как видно из табл. 1, прямая волна представлена тремя полными периодами, из которых только первый удовлетворяет условию $y_i = c/\text{ш} \geq 5$, а остальные две волны показывают $y_i = 1,5\text{--}2,5$. Общая продолжительность прямой волны до вступления объемно-преломленной составляет примерно 9 у. е. Общая продолжительность объемно-преломленной волны примерно 60 у. е., она вместила девять полных периодов колебаний пород, что при частоте $f = 500\text{--}1000$ Гц соответствует $\tau \approx (1\text{--}2) \cdot 10^{-2}$ с. Для объемно-преломленной волны необходимая величина $y_i = c/\text{ш} \geq 5$ также реализована только для первых волн, величина которых составила $c/\text{ш} \approx 9\text{--}12$ у. е. и в среднем $\bar{y}_i = 10,5$. Последующие волны показывают значения $y_i < 5$, а в конце периода после 40 у. е. приходят к уровню шума. Приведенные данные совпадают с мнением авторов [1], что в качестве расчетного сигнала надо принимать его первичное вступление.

Как следует из анализа значений n при $c/\text{ш} = 5$ (рис. 1), для достижения 95 % надежности результатов измерений объемно-преломленных волн (рис. 3, линия 3) при изменении величины коэффициента вариации от 0,2 до 0,4 необходимо использовать от 5 до 30 измерений. Для оценки объемно-преломленной волны (рис. 3, линия 3) при $c/\text{ш} = 10,5$, $p = 0,95$ и $K_b = 0,2$ нужно использовать $n \approx 14$ результатов измерений, что почти в 3,5 раза больше по сравнению с $c/\text{ш} = 5$, когда $n = 4$ (рис. 2). Необходимо отметить несколько других возможных вариантов стохастической оценки результатов измерений волнового просвечивания твердых материалов и горных пород, приведенных в [10–12].

ВЫВОДЫ

1. Предлагаемая методика может использоваться при стохастической оценке результатов измерений любых процессов, где необходимо оценить надежность выделения сигнала на фоне шума.

2. При стохастической оценке результатов измерений можно пользоваться простой условной шкалой, построенной на базе времени и величины уровня шума, принимаемых за единицу.

ЛИТЕРАТУРА

1. А н д р е й к о, С. С. Газодинамические явления в калийных рудниках / С. С. Андрейко, П. А. Калугин, В. Я. Щерба. – Минск: Вышэйш. шк., 2000. – 335 с.
2. T a g u c h i, G. System of Experimental Design: Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize Costs / G. Taguchi. – New York, UNIPUB / Kraus International Publications, White Plains, 1987. – Vols. 1, 2.
3. T a g u c h i, G. Taguchi Methods Case Studies from the U.S. and Europe / G. Taguchi, Y. Wu. – Tokyo, Japan: Japanese Standards Association, 1989. – Vol. 6. – 368 p.
4. О с и п о в, С. Н. О некоторых особенностях использования коэффициента вариации при статистической обработке экспериментальных данных / С. Н. Осипов // Вестник БНТУ. – 2005. – № 4. – С. 10–13.
5. Б а ж и н, Н. П. Статистическая обработка результатов испытаний физико-механических свойств кембрийских глин / Н. П. Бажин, В. А. Петров // Горное давление, сдвигание горных пород и методика маркшейдерских работ: сб. ВНИМИ. – Л., 1966. – Вып. 60. – С. 13–21.
6. С п о с о б определения минимального количества испытаний преимущественно строительных материалов и изделий: евразийский пат. № 014390: E04G 23/00, G01N 3/32 / С. Н. Осипов, В. М. Пилипенко; дата публ.: 29.10.2010.
7. Б р а у н л и, К. А. Статистические исследования в производстве / К. А. Браунли; под ред. А. Н. Колмогорова. – М.: Изд-во иностр. лит., 1949. – 228 с.
8. О с и п о в, С. Н. Об оценке надежности результатов испытаний физических свойств строительных материалов / С. Н. Осипов // Наука и техника. – 2014. – № 5 – С. 8–24.
9. П о р о д ы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии: ГОСТ 21153.2–84. – М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1984. – 16 с.
10. С е р е н к о в, П. С. Концепция робастного проектирования процессов в рамках системы менеджмента качества / П. С. Серенков, В. М. Романчик, Э. М. Короневич // Стандартизация и сертификация. Новости. – 2004. – № 2. – С. 64–67.
11. Г у б а р е в, В. В. Алгоритмы статистических измерений / В. В. Губарев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 272 с.
12. Н о в и ц к и й, П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зорграф. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

REFERENCES

1. A n d r e i k o, S. S., Kalugin, P. A., & Shcherba, V. Ya. (2000) *Gasdynamic Phenomena in Potassium Mines*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 335 p. (in Russian).
2. T a g u c h i, G. (1987) *System of Experimental Design: Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize Costs*. Vols. 1, 2. New York, UNIPUB / Kraus International Publications, White Plains.
3. T a g u c h i, G., & Wu, Y. (1989) *Taguchi Methods Case Studies from the U.S. and Europe*. Vol. 6. Tokyo, Japan. Japanese Standards Association. 368 p.
4. O s i p o v, S. N. (2005) On Certain Peculiarities of the Coefficient of Variation Application in the Statistical Processing of Experimental Data. *Vestnik BNTU* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], 4, 10–13 (in Russian).
5. B a z h i n, N. P., & Petrov, V. A. (1966) Statistical Processing of the Testing Results of Physical and Mechanical Properties of the Cambrian Clays. *Ground Pressure, Mountain Strata Movement and the Technique of Mine-Surveying Work. Collection of the Research Institute of Mining Geomechanics and Mine Surveying*. Leningrad, issue 60, 13–21 (in Russian).
6. O s i p o v, S. N., & Pilipenko, V. M. (2010) *A Method of Determining the Minimum Number of Tests Primarily Construction Materials and Products*. Eurasian Patent No 014390 (in Russian).
7. B r a u n l y, K. A., & Kolmogorov, A. N. (1949) *Statistical Studies in the Industrial Production*. Moscow, Foreign Literature Press. 228 p. (in Russian).
8. O s i p o v, S. N. (2014) On the Testing-Results Reliability Evaluation of the Physical Properties of Building Materials. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], 5, 8–24 (in Russian).
9. State Standard 21153.2–84. The Rocks. Estimation Methods of the Strength Limit at the Monoaxial Compression. Moscow: The USSR State Committee on Standards, 1984. 6 p. (in Russian).

10. S e r e n k o v, P. S., Romanchic, V. M., & Koronyevich, E. M. (2004) The Concept of Robust Projecting of the Processes Within the Quality Management System. *Standartizatsiia i Sertifikatsiia. Novosti* [Standardizing and Certification. News], 2, 64–67 (in Russian).

11. G u b a r e v, V. V. (1985) *Algorithms of the Statistical Measurements*. Moscow, Energoatomizdat. 272 p. (in Russian).

12. N o v i t s k i y, P. V., & Zorgraf, I. A. (1985) *Estimated Accuracy of the Measurement Results*. Leningrad, Energoatomizdat. 248 p. (in Russian).

Поступила 20.01.2015

УДК 536.24

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

Часть 1

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

Выполнено численное сравнение тепловой эффективности продольного течения однофазного потока внутри гладкой трубы с поперечным обтеканием шахматных и коридорных круглотрубных пучков в интервале $Re = (3-500) \cdot 10^3$ при одинаковой затрате мощности $N_0 = \text{idem}$ на прокачку газового (воздушного) потока. Количественно тепловую эффективность оценивали коэффициентом $\psi_i = \alpha_i/\alpha_k$, представляющим отношение коэффициента теплоотдачи исследуемой i -й поверхности к базовой k -й поверхности, принятой в качестве эталонной. Представлены формулы для расчета удельной затраты мощности N_0 при продольном и поперечном обтекании трубчатой поверхности. Показан способ учета местных потерь давления потока при вычислении удельной затраты мощности. Для получения сопоставимых значений ψ_i с целью исключения влияния площади поверхности теплообмена на результат необходимо затрату мощности вычислять по действительной величине площади поверхности.

Учет местных потерь давления потока на входе и выходе из трубы снижает коэффициент тепловой эффективности продольного течения на 33 %, и с этим фактом необходимо считаться при выполнении расчетов энергетической эффективности. Поперечное обтекание гладкотрубных пучков более эффективно по сравнению с продольным течением внутри трубы во всем интервале изменения числа Re . Тепловая эффективность шахматных пучков при $N_0 = \text{idem}$ на 10–13 % больше коридорных. В переходном интервале $Re = (3-10) \cdot 10^3$ при $N_0 = \text{idem}$ коэффициент теплоотдачи шахматного пучка при внешнем обтекании превышает теплоотдачу при течении воздуха внутри трубы в 5–2,1 раза, а при $Re = 10^5$ – в 1,6 раза.

Ключевые слова: коэффициент тепловой эффективности, продольное течение внутри трубы, поперечное обтекание шахматных и коридорных пучков, затраты мощности, энергетическая эффективность.

Ил. 3. Библиогр.: 11 назв.

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

Part 1

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. Masharov"

The authors present a numerical comparison of the thermal effectiveness of the monophasic-stream axial flowing inside a smooth pipe with transversal flow-around of staggered and in-line tube banks in interval $Re = (3-500) \cdot 10^3$ with equal power input $N_0 = \text{idem}$ for priming gas (air) flow. Coefficient $\psi_i = \alpha_i/\alpha_k$ estimates the thermal effectiveness quantitatively and represents the relation of heat-emission coefficients of surface i being examined to base-surface k assumed standard. The paper offers estimation formulae for the specific power input N_0 at axial and transverse flowing-around of the tubular surface and shows an accounting technique for the stream-pressure local losses. To exclude the heat-exchange surface square influence on the result and for obtaining the comparable values of ψ_i it is indispensable to calculate the power input by the effective value of the surface square.

While performing computations of the energy effectiveness it is necessary to reckon with the fact that accounting for the stream-pressure local losses at the tube entrance and exit reduces the axial-stream thermal effectiveness coefficient by 33 %. Transverse flow-around of the smooth tube banks is more efficient in comparison with the in-tube axial flow within the entire interval of numeral Re changing. The staggered banks thermal effectiveness at $N_0 = \text{idem}$ is by 10–13 % more than of the in-line ones. In transient interval $Re = (3-10) \cdot 10^3$ at $N_0 = \text{idem}$ the staggered-bank heat-emission coefficient with outside flow-around exceeds the heat-emission with in-tube air flow by 5–2,1 times, and at $Re = 10^5$ – by 1,6 times.

Keywords: coefficient of thermal efficiency, in-tube axial flow, transversal flow-around of staggered and in-line tube banks, power input, energy effectiveness.

Fig. 3. Ref.: 11 titles.

Гладкая круглая труба широко применяется в качестве поверхности теплообмена рекуперативных аппаратов промышленной тепло- и атомной энергетики, а также в теплотехнологических установках различных отраслей народного хозяйства. Нарастивание агрегатной мощности энергетических машин и технологических установок сопровождается увеличением габаритов теплообменных аппаратов (ТА), металлоемкость которых составляет заметную часть массы основного оборудования. Например, в нефтеперерабатывающих и химических производствах масса теплообменных аппаратов достигает 35–40 % общей массы всех технологических аппаратов, в паротурбинных установках это соотношение колеблется в интервале 45–55 %, а в холодильных машинах различных типов масса основной теплообменной аппаратуры составляет 55–70 % от общей массы машины.

Действенным направлением снижения массы и габаритов ТА является интенсификация теплообмена. В последние два десятилетия уделяется значительное внимание исследованию способа вихревой интенсификации теплообмена газовых (воздушных) потоков. Здесь вместо применения классических механических турбулизаторов [1] в виде искусственной пре-

дельной и дискретной шероховатости на теплоотдающей поверхности ретардеров, шнеков, завихрителей для воздействия на пограничный слой с целью его турбулизации и обновления применяются наносимые на поверхность углубления 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 в большом количестве публикаций по данному способу интенсификации, из которых следует отметить работы [2–4] с обстоятельной в них библиографией периодических изданий.

Подавляющее большинство публикаций посвящено вихревой интенсификации теплоотдачи плоских поверхностей щелевых прямых каналов, которые характерны для пластинчатых ТА, имеющих меньшее применение по сравнению с трубчатыми в различных отраслях промышленности и техники. Вместе с тем известны единичные работы [5, 6] по исследованию теплогидравлических характеристик цилиндрических труб с поверхностью из сферических лунок, реализующих способ вихревой интенсификации. Однако в публикациях отсутствует достаточная информация по геометрическим параметрам углублений, которая позволила бы вычислить увеличение теплоотдающей площади поверхности применением интенсификаторов, а не ограничиваться констатацией о ее незначительном изменении и использовании технически неопределенных понятий типа «мелкие, крупные лунки». Это позволило бы объективно выявить теплофизическую сторону такого способа интенсификации, разделив эффект по увеличению теплоотдачи на две составляющие: от наращивания теплоотдающей поверхности и вследствие воздействия образованных вихревых структур углублениями. В литературе отсутствуют количественные оценки эффективности вихревой интенсификации теплоотдачи по единой методике в сопоставимых условиях тепловой, примененной для круглой трубы при разных направлениях течения потока. Такая труба является базовой для значительной группы рекуперативных ТА.

При экспериментальном исследовании поперечно обтекаемых пучков аэродинамическое (гидравлическое) сопротивление включает местные сопротивления входа потока в пучок и выхода из него. В формулах для расчета сопротивления продольно обтекаемых труб нет местных сопротивлений входа и выхода, которые учитываются отдельно через коэффициент местных сопротивлений и суммируются с сопротивлением трубы. Поэтому при сопоставлении тепловой эффективности поперечного обтекания пучка с эффективностью трубы в продольном потоке необходимо последнюю рассчитывать с учетом местных сопротивлений.

С учетом изложенного цель исследований авторов статьи состояла в следующем:

- выполнить сравнение тепловой эффективности гладкой трубы в продольном потоке с учетом местных сопротивлений и без них в широком интервале Re , охватывающем режимы эксплуатации гладкотрубных газогазовых ТА;
- провести сравнение тепловой эффективности шахматных и коридорных пучков из гладких труб в поперечном потоке между собой и эффек-

тивностью продольно обтекаемой трубы, являющихся базой (эталоном) для вычисления количественных значений коэффициента эффективности вихревого способа интенсификации теплоотдачи.

Для достижения поставленной цели использована известная методика В. М. Антуфьева [7] для сравнения конвективных поверхностей по тепловой эффективности. Согласно этой теории в логарифмических координатах $\alpha = f(N_0)$ построены кривые эффективности сопоставляемых поверхностей, а тепловое (энергетическое) совершенство оценено при одинаковой затрате мощности $N_0 = \text{idem}$, Вт/м², на прокачку теплоносителя коэффициентом тепловой эффективности

$$\psi_i = \frac{\alpha_i}{\alpha_k}, \quad (1)$$

где α_i , α_k – коэффициент теплоотдачи i -й и k -й (принятой за эталон или базу) поверхности теплоотдачи, Вт/(м²·К).

Формула для вычисления N_0 по площади поверхности гладкой трубы (пучка труб) зависит от характера течения потока. Величины N_0 определены по следующим формулам [7]:

- при продольном течении потока внутри гладкой трубы (канала) или внешнем продольном обтекании трубы

$$N_0 = 0,125 \zeta \rho w^3; \quad (2)$$

- при продольном течении потока с учетом местных входных и выходных сопротивлений

$$N_0 = 0,125 \left(\zeta + \frac{\chi_{\text{вх}}}{L/d} + \frac{\chi_{\text{вых}}}{L/d} \right) \rho w^3; \quad (3)$$

- при продольном течении потока с учетом фактической площади поверхности трубы, измененной нанесением углублений, шероховатости и иных механических деформаций

$$N_0 = 0,125 \frac{\zeta}{\phi} \rho w^3; \quad (4)$$

- при поперечном внешнем обтекании потока гладкотрубного пучка

$$N_0 = 0,319 (\sigma_1 - 1) \text{Eu}_0 \rho w^3, \quad (5)$$

где ζ – коэффициент гидравлического сопротивления трубы; $\chi_{\text{вх}}$, $\chi_{\text{вых}}$ – коэффициент местного сопротивления при входе и выходе из трубы соответственно; L – длина трубы, м; d – внутренний диаметр трубы (эквивалентный диаметр канала) или наружный диаметр трубы при поперечном обтекании ее потоком, м; $\phi = F/F_{\text{гл}}$ – коэффициент увеличения площади поверхности трубы; F – фактическая площадь поверхности трубы, м²; $F_{\text{гл}}$ – то же гладкой трубы диаметром d , м²; $\text{Eu}_0 = \text{Eu}/z$ – число Эйлера, отнесенное к одному поперечному ряду пучка по направлению потока; z – число поперечных рядов труб в пучке; $\sigma_1 = S_1/d$ – относительный поперечный шаг труб в пучке; ρ – плотность потока, кг/м³; w – скорость потока в трубе или в сжатом сечении пучка, м/с.

При вычислении α , ζ , Eu_0 использованы уравнения подобия для конкретного режима течения. Диаметры труб при сравнении приняты одинаковыми $d = 20$ мм. Физические параметры теплоносителя λ , ν , ρ принимали при средней температуре потока 50°C и давлении $0,1$ МПа, здесь λ – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/(м·К); ν – коэффициент кинематической вязкости теплоносителя, $\text{м}^2/\text{с}$.

На представленных рис. 1–3 при условных обозначениях (символах) указаны численные значения числа Рейнольдса Re , для которых вычислены коэффициент теплоотдачи α и затрата мощности N_0 .

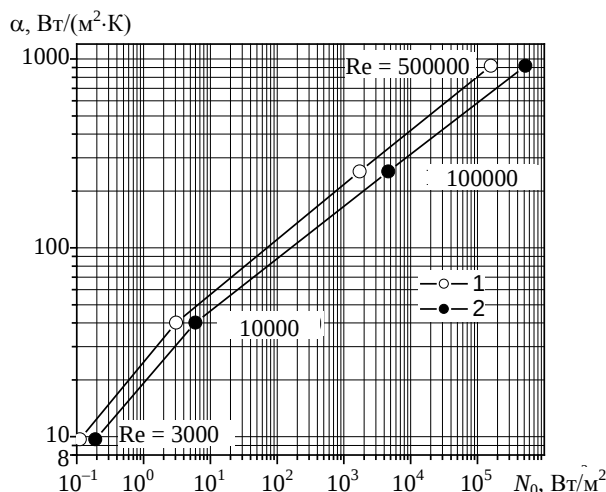


Рис. 1. Влияние местных потерь давления потока на тепловую эффективность трубы с внутренним продольным течением: 1 – гладкая труба; 2 – труба с учетом местных потерь давления

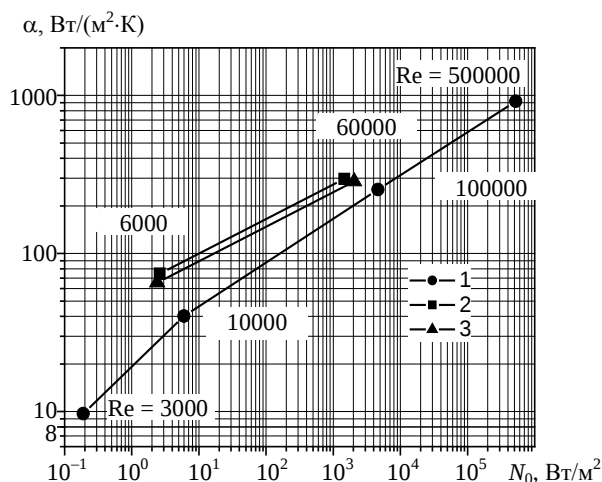


Рис. 2. Сравнение тепловой эффективности внешнего поперечного и внутреннего продольного течения потока: 1 – гладкая труба с учетом местных потерь давления; 2 – шахматный пучок; 3 – коридорный пучок (гладкие трубы)

Тепловая эффективность гладкой трубы ($L/d = 50$) при продольном течении воздуха с учетом входных и выходных сопротивлений ($\chi_{\text{вх}} = 1,0$; $\chi_{\text{вых}} = 0,5$) в среднем на 33 % ниже (рис. 1) данной характеристики без уче-

та этого фактора в интервале $Re = (3-500) \cdot 10^3$. Следовательно, мощности на прокачку газового теплоносителя потребуется в 1,33 раза больше и необходимо принимать во внимание влияние этого фактора при сравнительном сопоставлении энергетической эффективности поверхностей теплообмена, что ранее отмечалось на качественном уровне в [7]. Полученное значение $\psi_i = 1,33$ хорошо согласуется с вариантными расчетами кожухотрубного газо-газового теплообменника [8], в котором получено отношение мощностей на прокачку теплоносителя без учета приемно-выводных устройств, равное 1,83, а с учетом этих устройств – 1,40. Значит, $\psi_i \approx 1,83/1,4 = 1,31$.

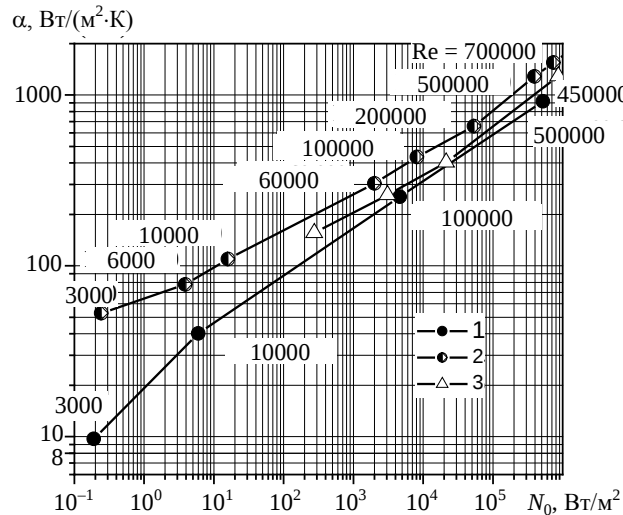


Рис. 3. Кривые тепловой эффективности шахматного гладкотрубного пучка в до- и закритическом режимах поперечного течения и течения внутри гладкой трубы по данным: 1 – рис. 2; 2, 3 – соответственно по [10] и [11]

Для расчета коэффициентов теплоотдачи и затрат мощности поперечно обтекаемых шахматных и коридорных гладкотрубных десятирядных пучков с относительными $\sigma_1 = 1,25d$ и продольным $\sigma_2 = 1,08d$ шагами газовым потоком в интервале $Re = (6-60) \cdot 10^3$ использованы формулы ВТИ [9], которые применяются для теплоаэродинамических расчетов поверхностей нагрева котельных агрегатов. Кривые тепловой эффективности $\alpha = f(N_0)$ на рис. 2 указывают на энергетическое преимущество поперечного обтекания круглотрубных поверхностей в сравнении с продольным внутренним. Особенно энергетически выгодно применение поперечного течения в области низких значений $Re \leq 10^4$. Например, в интервале $Re = (6-10) \cdot 10^4$ при $N_0 = idem$ коэффициент тепловой эффективности шахматного пучка находится в диапазоне $\psi_\varnothing = 2,78-1,48$ по отношению к продольному течению потока. Тепловая эффективность шахматных пучков больше коридорных на 10–13 %, что не противоречит данным [7]. Сказанное хорошо согласуется с результатами, приведенными на рис. 3. Видно, что в переходной области $Re = (3-10) \cdot 10^4$ продольного течения теплоносителя при $N_0 = idem$ коэффициенты теплоотдачи гладкотрубного шахматного пучка с поперечным обтеканием превышают в 5–2,1 раза интенсивность теплоотдачи

внутри трубы. Однако с ростом затрат мощности N_0 (увеличение Re) кривые тепловой эффективности поперечного и продольного течения (рис. 2, 3) непрерывно сближаются, но при достижении $Re \geq 130000$ [10], а по другим данным – при $Re \geq 200000$ [11] конвективный теплообмен в пучках существенно интенсифицируется. Тангенс угла наклона кривой теплоотдачи резко возрастает, стремясь к единице, а число Eu для пучков доходит до некоторого постоянного значения $Eu = const$ и остается неизменным, несмотря на увеличение Re . Режим течения достигает автомодельности. Течение потока в пограничном слое на поверхности из смешанного переходит в преобладающе турбулентное. Указанные явления изменяют характер кривой $\alpha = f(N_0)$ при поперечном обтекании, которая начинает отклоняться более круто от кривой продольного течения, оставаясь выше ее. В закритическом режиме обтекания, когда $Re > (130-200) \cdot 10^3$, коэффициент тепловой эффективности шахматного пучка $\psi_{ш}$ равен 1,49 и 1,53 соответственно для $Re \approx 500 \cdot 10^3$ и $700 \cdot 10^3$ исходя из кривой $\alpha = f(N_0)$, построенной по обобщенным уравнениям подобия [11], которые экспериментально обоснованы по единой методике в интервале $Re = (3-700) \cdot 10^3$. Величины $\psi_{ш}$, вычисленные по кривой эффективности для шахматного пучка согласно [10], в среднем на 25–30 % меньше. Таким образом, поперечное обтекание пакетов из круглых труб эффективнее в сравнении с продольным во всем интервале значения Re , встречающегося в промышленных ТА общего назначения.

ВЫВОДЫ

1. Поперечное обтекание однофазным потоком гладких труб системы «пучок» во всем интервале изменения числа Рейнольдса, включая и закритический режим течения потока, отличается более высокой тепловой эффективностью в сравнении с продольным движением.

2. Тепловая эффективность шахматного расположения гладких труб в пучке превышает эффективность коридорного при одинаковых затратах мощности на прокачку потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бузник, В. М. Интенсификация теплообмена в судовых установках / В. М. Бузник. – Л.: Судостроение, 1969. – 364 с.
2. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю. А. Быстров [и др.]. – СПб.: Судостроение, 2005. – 390 с.
3. Халатов, А. А. Тепломассообмен и теплогидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков / А. А. Халатов, И. И. Борисов, С. В. Шевцов. – Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2005. – 500 с.
4. Халатов, А. А. Вихревые технологии аэротермодинамики в энергетическом газотурбостроении / А. А. Халатов. – Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2005. – 292 с.
5. Экспериментальное исследование тепловых и гидравлических характеристик теплообменных поверхностей, формованных сферическими лунками / М. Я. Бельский [и др.] // Теплофизика высоких температур. – 1991. – Т. 29, № 8. – С. 1142–1147.
6. К вопросу выбора типа водо-водяных подогревателей для систем теплоснабжения // К. В. Пермяков [и др.] // Промышленная энергетика. – 2000. – № 4. – С. 37–44.

7. Антуфьев, В. М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева / В. М. Антуфьев. – Л.: Энергия, 1966. – 184 с.
8. Мартыненко, О. Г. Эффективность интенсификации теплообмена в компактном кожухотрубном теплообменнике // О. Г. Мартыненко, Н. М. Горбачев, В. А. Бабенко // Тезисы докладов и сообщений XIV Минского междунар. форума по тепло- и массообмену 10–13 сентября 2012 г. – Минск, 2012. – Т. 2, ч. 1. – С. 99–101.
9. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
10. Ляпин, М. Ф. Теплоотдача и аэродинамическое сопротивление гладкотрубных пучков при больших числах Re / М. Ф. Ляпин // Теплоэнергетика. – 1956. – № 9. – С. 49–52.
11. Жукаускас, А. А. Теплоотдача пучков труб в поперечном потоке жидкости / А. А. Жукаускас, В. И. Макарявичюс, А. А. Шланчяускас. – Вильнюс: Минтис, 1968. – 192 с.

REFERENCES

1. Buznik, V. M. (1969) *Intensification of Heat Exchange in the Ship Installations*. Leningrad, Sudostroenie Publ. 364 p. (in Russian).
2. Bystron, Yu. A., Isaev, S. A., Kudryavcev, N. A. & Leont'ev, A. I. (2005) *Numerical Modelling of the Vortical Intensification of Heat Exchange in the Packages of Pipes*. St. Petersburg, Sudostroenie Publ. 390 p. (in Russian).
3. Khalatov, A. A., Borisov, I. I., & Shevtsov, S. V. (2005) *Heat and Mass Transfer and Thermal-Hydraulic Efficiency of Vortex and Swirling Flows*. Kyiv, Institute for Engineering Thermophysics, NAS Ukraine. 500 p. (in Russian).
4. Khalatov, A. A. (2005) *Aerothermodynamic Vortex Technologies in Power-Engineering Gas-Turbines Building*. Kyiv, Institute for Engineering Thermophysics, NAS Ukraine. 292 p. (in Russian).
5. Belenky, M. Ya., Gotovsky, M. A., Lekah, B. M., Fokin, B. S., & Habensky, V. B. (1991) The Experimental Research of Thermal and Hydraulic Characteristics of Heat-Exchange Surfaces Formed by Spherical Lunules. *Teplofizika Vysokih Temperatur* [Thermal Physics of High Temperatures], 29, 8, 1142–1147 (in Russian).
6. Permyakov, V. A., Permyakov, K. V., Yakimenko, A. N., & Neiburger, A. N. (2000) On Selecting the Type of Water-to-Water Heaters for Heating-Supply Systems. *Promyshlennaya Energetika* [Power Engineering], 4, 37–44 (in Russian).
7. Antuf'ev, V. M. (1966) *The Effectiveness of Various Forms of Convective Heating Surfaces*. Leningrad, Energia. 184 p. (in Russian).
8. Martynenko, O. G., Gorbachev, N. M., & Babenko, V. A. (2012) Effectiveness of Heat-Exchange Intensification in the Compact Shell-and-Tube Heat Exchanger. *XIV Minsk International Heat and Mass Transfer Forum: Abstracts of the Reports and Communication. Vol. 2, Part 1*. Minsk: Heat and Mass Transfer Institute of the NAS of Belarus, 99–101 (in Russian).
9. Isachenko, V. P., Osipova, V. A., & Sukomel, A. S. (1975). *Heat Transfer*. Moscow, Energia. 488 p. (in Russian).
10. Lypin, M. F. (1956) Heat Emission and Aerodynamic Resistance of the Bare-Tube Banks at Reynolds Big Numbers. *Teploenergetika* [Heat Engineering], 9, 49–52 (in Russian).
11. Zhukauskas A. A., Makaryavichyus, V. I., & Shlanchauskas, A. A. (1968) *Heat Emission of the Tube Banks in Transverse Flow of Liquid*. Vilnius. Mintis. 192 p. (in Russian).

Представлена кафедрой энергосбережения,
гидравлики и теплотехники

Поступила 03.02.2015

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

Часть 1

**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

Для снижения потерь в холодном источнике (конденсаторе) и повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов представлена современная автоматическая система шариковой очистки трубок конденсатора 180-КЦС-1 турбоагрегата Т-180/210-130-1 ЛМЗ Гомельской ТЭЦ-2. Рассмотрены проблемы эксплуатации конденсаторов паровых турбин и методы их очистки от отложений. В зависимости от характера и состава отложений, качества охлаждающей воды на электростанциях применяются различные способы очистки конденсаторных трубок: термическая и вакуумная сушки, кислотные промывки, простреливание трубок из водяных и водовоздушных пистолетов, промывка высоконапорной струей воды и др. Все используемые методы очистки являются периодическими средствами борьбы с отложениями и требуют остановки или разгрузки турбины, обуславливают работу оборудования с постоянно загрязняемой между чистками поверхностью охлаждения конденсаторов, т. е. с пониженной экономичностью работы оборудования.

Установка системы шариковой очистки практически исключает недостатки химических и механических методов очистки, что приводит к увеличению срока службы конденсаторных трубок, а также улучшению качества основного конденсата и повышению надежности и экономичности работы оборудования паровых турбин. Разработаны алгоритмы обработки информации и управления системой шариковой очистки конденсатора, что позволило реализовать ее работу в автоматическом режиме.

Ключевые слова: система технического водоснабжения, конденсатор паровой турбины, способы очистки конденсаторных трубок, система шариковой очистки, автоматическая система управления.

Ил. 4. 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 1

**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*

In order to reduce losses in the cooling source (condenser) and to increase effectiveness of fuel-and-power resources utilization, the authors present a modern automatic ball-cleaning system for the pipes of condenser 180-KTsS-1 of turbine unit T-180/210-130-1 LMZ of Gomel CHP-2. The article examines exploitation challenges of the steam turbine condensers and methods of clearing them from sedimentations. Depending on the sedimentation character and composition, and the quality of cooling water at the power plant, they apply various methods of the condenser tubes clearing: heat drying, vacuum dehydration, acid-washing, pipes-shooting with water and water-air pistols, ablution with high-pressure water jet etc. All the applied cleaning methods are the periodical means to fight the sedimentations and

require the turbine halting or unloading, predetermine the equipment operating between clearings with constantly smearing cooling surfaces of the condensers, i.e. with reduced efficiency of equipment operation.

The installation of the ball-cleaning system practically excludes defects of the chemical and mechanical cleaning methods, which leads to the condenser pipes life-in-service increase, the full-flow condensate quality improvement, reliability and efficient performance enhancement of the steam turbines equipment. The authors consider developed algorithms of data processing and designed system control of the condenser cleaning that allowed realizing its operation in automatic mode.

Keywords: service water system, steam turbine condenser, condenser tubes cleaning methods, ball-cleaning system, automatic-control system.

Fig. 4. Ref.: 10 titles.

Введение. Основная причина ухудшения вакуума в конденсаторах паровых турбин по сравнению с нормативными значениями – загрязнение трубок с водяной стороны. Отложения, образующиеся в конденсаторных трубках, ухудшают теплопередачу и являются одной из причин их коррозионного разрушения. В зависимости от характера и состава отложений, качества охлаждающей воды на электростанциях применяются различные способы очистки конденсаторных трубок: термическая и вакуумная сушки, кислотные промывки, простреливание трубок из водяных и водовоздушных пистолетов, промывка высоконапорной струей воды и др. Все используемые методы очистки являются периодическими средствами борьбы с отложениями и требуют остановки или разгрузки турбины, обуславливают работу оборудования с постоянно загрязняемой между чистками поверхностью охлаждения конденсаторов, т. е. с пониженной экономичностью работы оборудования.

В период между двумя чистками турбоагрегаты эксплуатируются с постепенно ухудшающимся вакуумом в конденсаторах. Ухудшение вакуума между чистками достигает 1–4 %. Кроме того, периодическая очистка конденсаторных трубок трудоемка и связана обычно с большими затратами средств. Разработанный способ очистки конденсаторных трубок с помощью эластичных шариков из губчатой резины (рис. 1, 2) нашел широкое применение в мировой энергетике. Использование мягкого шарика, диаметр которого на 1–2 мм больше внутреннего диаметра трубки, позволяет удалять с ее поверхности все виды вновь образующихся и недостаточно закрепленных отложений и поддерживать исходную чистоту трубки [1–10].

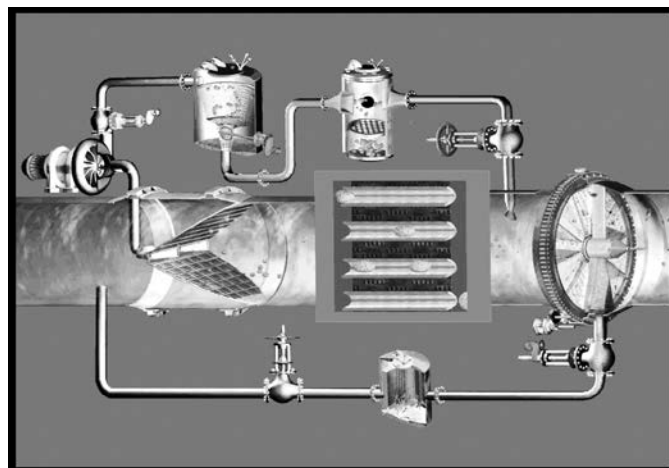


Рис. 1. Общий вид системы шариковой очистки конденсатора

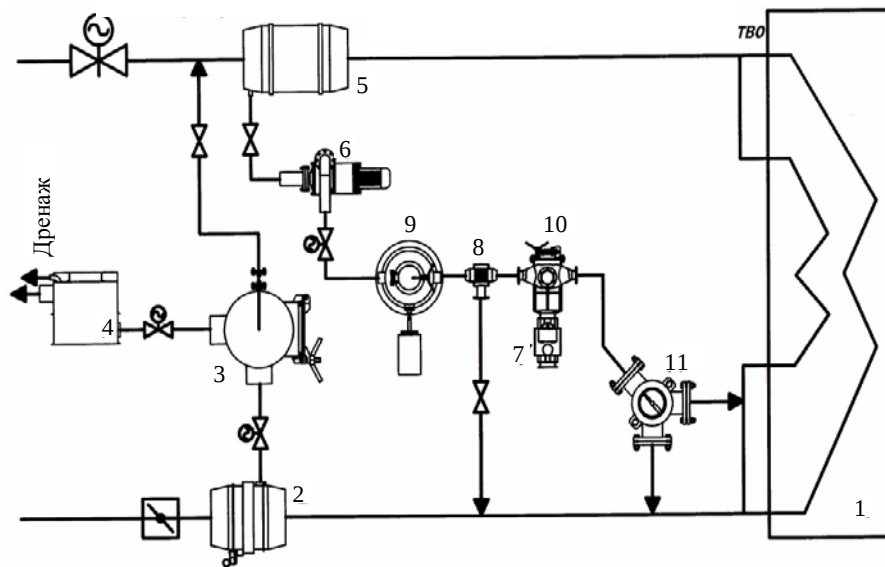


Рис. 2. Принципиальная схема системы шариковой очистки конденсатора 180-КЦС-1 турбоагрегата Т-180/210-130-1 ЛМЗ: 1 – конденсатор; 2 – фильтр предварительной очистки; 3 – грязевой фильтр; 4 – грязевой бак; 5 – шарикоулавливающее устройство; 6 – насос шариковой очистки; 7 – бак отработавших шариков; 8 – разгрузочное устройство; 9 – загрузочная камера; 10 – калибрующее устройство; 11 – распределительное устройство

Постановка задачи. Цель исследований авторов – обоснование экономической целесообразности и анализ результатов внедрения системы шариковой очистки (СШО) конденсатора турбоустановки Т-180/210-130-1 ЛМЗ для повышения эффективности системы технического водоснабжения электростанции. Схема технического водоснабжения блоков Гомельской ТЭЦ-2 (рис. 3) обратная. Охлаждающая вода поступает по двум бетонным каналам в аванкамеру объединенной насосной станции и затем из аванкамеры по пяти стальным трубопроводам к каждому циркуляционному насосу.

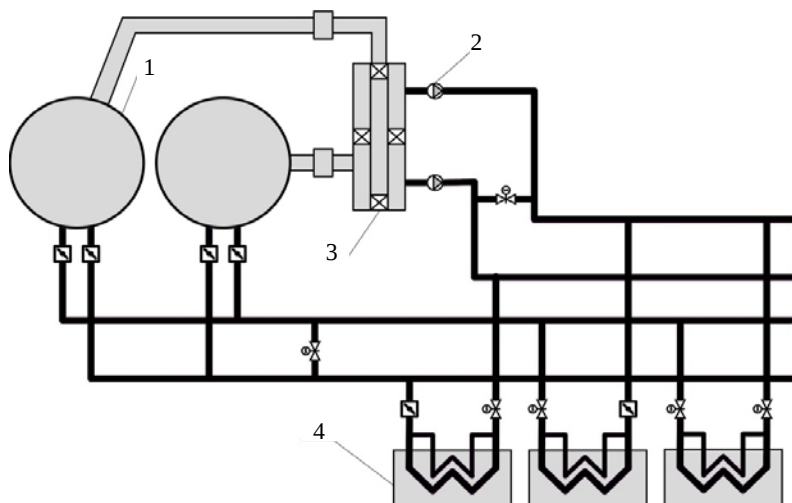


Рис. 3. Принципиальная схема технического водоснабжения:
1 – градирня; 2 – циркуляционный насос; 3 – аванкамера; 4 – конденсатор

Насосы подают воду на магистральные водоводы, от которых вода по напорным трубопроводам поступает на основной и встроенный пучки конденсаторов. После конденсаторов по сливным магистральным трубопроводам вода направляется в градирни. Охлаждение циркуляционной воды происходит в градирнях.

Восполнение потерь воды в системе технического водоснабжения производится из трубопровода, подающего ее на Гомельский химзавод, насосами станции II подъема РУП «Водоканал» из реки Сож. Изменение подачи насосов осуществляется варьированием количества одновременно включенных циркуляционных насосов. На всасе циркуляционных насосов установлены сороудерживающие сетки.

Проблемы эксплуатации конденсаторов турбин. Основной особенностью внешней среды, с которой соприкасается внутренняя поверхность металла конденсаторных трубок, является насыщение и даже перенасыщение ее воздухом, полное удаление которого из циркуляционной системы невозможно. Касаясь способа охлаждения конденсатора, следует заметить, что обратная система охлаждения более опасна в отношении коррозии металла конденсаторных трубок, чем прямоточная, вследствие повышения уровня температуры охлаждающей воды, а главное в отношении накопления ишламообразования, способствующего протеканию так называемой подшламовой коррозии.

При различных характерных коррозионных процессах, повреждающих конденсаторные трубки, они могут различаться большей или меньшей степенью локализации процесса на поверхности металла и по длине трубки. Практически наибольшая опасность для эксплуатации конденсаторов возникает при локализации коррозии, вследствие чего наиболее вредными являются те факторы, которые способствуют нарушению равномерного разъедания поверхности трубки, так как обычно в этих отдельных точках интенсивность коррозии резко возрастает. Особый вид разрушения конденсаторных трубок – «ударная коррозия» – образование язвин на входных концах трубок под действием потока воды, содержащего пузырьки воздуха и движущегося с большой скоростью.

Многолетний опыт эксплуатации конденсаторов и исследований коррозионных явлений внутренней поверхности трубок показал, что устойчивость металла определяется, главным образом, защитными свойствами образующейся на внутренней поверхности оксидной пленки. Эта пленка состоит из оксидных соединений меди и цинка: хлоридов, карбонатов, гидроокисей и окислов этих металлов, а также основных солей. Кроме того, слой продуктов коррозии латуни часто включает в себя также посторонние вещества – окислы железа, являющиеся продуктом ржавления водяных камер и трубопроводов, карбонат кальция, гидроокись и основной карбонат магния и т. д. При высоких защитных свойствах пленки разрушение металла конденсаторной трубки может быть практически прекращено, если пленка не имеет повреждений по всей длине трубки.

Охлаждающая вода, используемая на Гомельской ТЭЦ-2, по общему солесодержанию относится к среднеминерализованным водам (сухой остаток – 414 мг/кг). Общая жесткость, обусловленная наличием ионов кальция и магния, составляет 5,45 мг-экв/кг, а щелочность воды, определяемая присутствием бикарбонатных ионов кальция и магния (3,80 мг-экв/кг), представлена карбонатной жесткостью. Отложения, находящиеся в коррозионной язве, также в основном состоят из окиси меди и имеют повышенные

потери при прокаливании по сравнению с общими отложениями, которые обусловлены наличием органических веществ.

Решение задачи. Основным фактором борьбы с коррозией конденсаторных трубок можно считать обеспечение чистоты поверхности охлаждения, т. е. предотвращение «осадочной» коррозии, связанной с наличием рыхлых отложений или отдельных твердых инородных частиц. Организованный контур циркуляции шариков через трубки конденсатора в системе шариковой очистки как раз и оказывает благотворное влияние на коррозионную стойкость конденсаторных трубок.

Как отмечалось выше, наибольшую опасность представляют собой локальные коррозионные процессы. Но любому локальному процессу предшествует образование центра концентрации коррозии, как правило, под слоем шлама, накипи или других загрязнений. Резиновый шарик диаметром больше внутреннего диаметра трубки, регулярно проходя внутри трубки, предотвращает образование очага концентрации, удаляя шлам, слизь, не позволяя карбонату кальция выпадать в осадок, не повреждая оксидный слой. На пленке, покрывающей поверхность трубки, оседают твердые нерастворимые в воде частички (осадок карбоната кальция или механические примеси – песок, уголь и т. д.). Они препятствуют свободному доступу кислорода к поверхности металла, вследствие чего образование вторичных нерастворимых продуктов коррозии происходит вне физического контакта с поверхностью металла. Шарик не дает оседать на оксидной пленке твердым нерастворимым в воде частичкам.

Прилипшие к поверхности трубки пузырьки воздуха, подобно осадкам (загрязнениям), могут вызывать эффект, аналогичный неравномерной аэрации. Разъедаться металл будет вокруг прилипшего пузырька воздуха, кроме того, интенсификация коррозии будет наблюдаться вследствие местного повышения температуры металла – «эффект горячей стенки». Циркуляция шариков также предотвращает залипание пузырьков воздуха на поверхности трубок.

Большая номенклатура шариков по твердости и другим свойствам позволяет подобрать для конкретного конденсатора, охлаждающей воды и ожидаемых отложений индивидуальные типоразмеры чистящих шариков. Так, большие перспективы и положительный опыт использования на ряде электростанций с точки зрения коррозионной защиты представляет применение полирующих шариков, которые наряду с традиционными функциями предотвращения загрязнений трубок конденсатора обладают свойством улучшения оксидной пленки по всей длине трубки, «укатывая и полируя» последнюю.

Наличие в СШО фильтра предварительной очистки предотвращает попадание крупнодисперсного мусора в конденсатор (ракушек, камней и т. д.), что приводит к снижению абразивного износа оксидной пленки трубок конденсатора и предотвращает процессы коррозии. Разделка концов трубок в трубных досках под «колокольчик» для организации циркуляции шариков и уменьшения их износа на ряде станций привела к снижению ударной коррозии входных частей трубок конденсатора, видимо, из-за уменьшения турбулентности потока воды и ее скорости на входе в трубку.

Следует отметить, что при отсутствии СШО на оборудовании применяется традиционный – химический – метод очистки трубок конденсатора с использованием ингибированной соляной кислоты и других реагентов.

Как показал опыт, данный способ очистки не дает полного растворения накипи, так как образующаяся при реакции карбоната кальция с соляной кислотой обильная пена препятствует равномерному контакту кислоты с накипью в верхних образующих трубок. Отложения, находящиеся на нижних образующих, растворяются интенсивно до тех пор, пока они остаются прикрепленными к поверхности металла. При попадании кислоты под слой отложений на отдельных участках трубок происходит отделение накипи от поверхности металла. Эти нерастворившиеся остатки, попадая в зону пены, не только прекращают дальнейшее растворение, но и застают, скапливаясь в трубке, закупоривают ее живое сечение. Оголенные же участки трубок, продолжая омываться кислотой, подвергаются интенсивной коррозии. После такой кислотной промывки требуется обязательная механическая доочистка трубок от нерастворившейся накипи, что является очень трудоемкой операцией, требующей длительного останова турбоагрегата. Кроме того, кислотные промывки относятся к периодическим мерам очистки, после которых происходят новые накипеобразование и загрязнение, что в условиях разрушения оксидного слоя кислотой приводит к еще более интенсивной коррозии металла трубок.

Установка СШО позволит практически исключить недостатки химических и механических методов очистки, что увеличит срок службы конденсаторных трубок, а также улучшит качество основного конденсата турбины и повысит надежность работы турбинного оборудования.

Описание системы шариковой очистки. СШО конденсатора состоит из двух автономных технологических схем – предварительной очистки охлаждающей воды и циркуляции шариков [1].

Принципиальная схема СШО конденсатора 180-КЦС-1 турбоагрегата Т-180/210-130-1 ЛМЗ Гомельской ТЭЦ-2 представлена на рис. 2.

Схема предочистки состоит из следующего оборудования:

- фильтра предварительной очистки (ФП);
- грязевого фильтра (ГФ);
- грязевого бака (ГБ);
- трубопровода сброса очищенной от загрязнений в ГФ охлаждающей воды в сливной циркуляционный водовод;
- трубопровода сброса загрязнений из ГФ в ГБ;
- технологической арматуры.

Схема циркуляции шариков соответственно состоит из:

- шарикоулавливающего устройства (ШУУ);
- насоса шариковой очистки (НШО);
- загрузочной камеры (ЗК);
- калибрующего устройства (КУ);
- бака для отработавших шариков (БОШ);
- разгрузочного устройства (РУ);
- узла распределения (УР) шариков по основному и встроенному пучкам конденсатора;
- узлов ввода шариков в напорные трубопроводы основного и встроенного пучков перед конденсатором;
- трубопроводов транспортировки шариков из сливного циркуляционного водовода в напорные;
- технологической арматуры.

Сороудерживающие сетки на всасе насосов в силу своих конструктивных недостатков не могут полностью предотвращать попадание различно-

го мусора в систему циркуляционного водоснабжения. Для предотвращения задержки (залипания) шариков на трубных досках или в конденсаторных трубках из-за различного рода мусора, приносимого охлаждающей водой, циркуда предварительно подвергается механической очистке в фильтре предочистки. Этот фильтр предназначен для очистки охлаждающей воды от крупнодисперсного мусора (щепа, гравий, органика и пр.), который, засоряя трубные доски, препятствует прохождению шариков через конденсаторные трубки. Затем вода с мусором направляется в грязевой фильтр, предназначенный для очистки загрязненной воды, поступающей из ФП во время его отмывки. Отфильтрованная (чистая) вода направляется в сливной циркуляционный водовод, а вода с мусором в ГБ, который собирает мусор, с целью его последующего вывоза и утилизации.

Как известно, принцип работы СШО основан на циркуляции пористых резиновых шариков (ПРШ) через внутренние поверхности конденсаторных трубок. Шарик загружается в ЗК, предназначенную для загрузки и ввода шариков в контур циркуляции. После включения НШО, который транспортирует ПРШ по контуру циркуляции, шарик по трубопроводам транспортировки через РУ (позволяет регулировать расход воды через КУ) направляется в КУ. В КУ происходят калибровка и своевременный вывод изношенных шариков из контура циркуляции, которые направляются в БОШ. Через распределитель шариков и далее через узлы ввода шарик попадает в напорные циркуляционные водоводы основного и встроенного пучков конденсатора. Вместе с охлаждающей водой шарик проходит через трубки конденсатора (под действием разности давлений на входе и выходе), при этом шарик, плотно прилекая к стенкам трубок, предотвращает органические отложения и очаги зарождения минеральных отложений на их внутренней поверхности. Прошедшие через конденсатор ПРШ попадают в сливной циркуляционный водовод, где задерживаются установленным ШУУ. Затем НШО отсасываются из устья ШУУ и направляются обратно в контур циркуляции. Кроме этого, обязательно устанавливается автоматика управления работой СШО (обеих технологических схем), которая позволяет реализовать работу системы в автоматическом режиме.

Управление СШО конденсатора полностью автоматизировано и выведено на ПЭВМ, находящуюся на блочном щите управления (рис. 4).

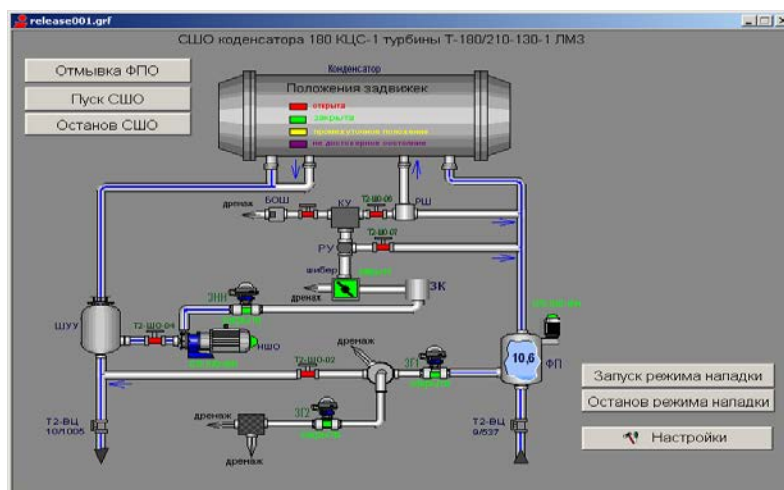


Рис. 4. Мнемосхема автоматики управления системы шариковой очистки конденсатора 180-КЦС-1 турбоагрегата Т-180/210-130-1 ЛМЗ

Автоматическая система управления шариковой очисткой (АСУШО) предназначена для автоматического и ручного управления СШО и отдельных ее элементов, а также для контроля за оборудованием СШО. Создана многоуровневая иерархическая система, где:

- на нижнем уровне находятся датчики и исполнительные механизмы;
- на среднем уровне применен проектно-компонентный контроллер ПИКОН-2, в задачи которого входят сбор и предварительная обработка информации, выработка управляющих воздействий, обмен информацией с верхним уровнем;
- верхним уровнем управления является операторская станция на базе персонального компьютера.

АСУШО – открытая система, допускающая наращивание задач. Программное обеспечение реализовано на базе SCADA-системы iFix. Разработаны алгоритмы обработки информации и управления системы шариковой очистки конденсатора. Программные средства являются открытыми для пользователя и имеют возможность самостоятельной работы системы и настройки компонентов без участия профессиональных программистов.

ВЫВОДЫ

1. На сегодняшний день система шариковой очистки – самый эффективный способ борьбы с отложениями в трубках конденсатора паровых турбин. Установка очистки конденсаторов шариками из пористой резины, являясь профилактическим экологически чистым средством поддержания в чистоте охлаждающей поверхности трубных систем конденсатора, позволит снизить:

- фактическое гидравлическое сопротивление системы циркуляционного водоснабжения за счет отсутствия загрязнения трубок и трубных досок конденсатора после установки фильтров предварительной очистки и работы очищающих шариков;
- давление пара в конденсаторе турбины при поддержании шариковой очистки в чистоте охлаждающей поверхности конденсатора, что приведет к экономии топлива;
- ограничение максимальной электрической мощности турбоагрегата из-за ухудшения вакуума в конденсаторе;
- затраты на ремонт конденсаторов в период плановых остановов.

2. Использование системы шариковой очистки практически исключает недостатки химических и механических методов очистки, что приведет к увеличению срока службы конденсаторных трубок, а также улучшению качества основного конденсата и повышению надежности работы оборудования паровых турбин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зенович-Лешкевич-Ольпинский, 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.
2. Наладка системы шариковой очистки конденсатора турбины К-300-240 ЛМЗ блока № 1 Лукомльской ГРЭС. Технический отчет. – М.: Союзтехэнерго, 1988. – 55 с.
3. Разработка и внедрение новых конструкций аппаратов и технологических схем СШО конденсаторов турбин блоков Лукомльской ГРЭС. Технический отчет. – М.: Союзтехэнерго, 1990. – 68 с.

4. 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.
5. Энергетические 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.
6. 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.
7. Руководящие указания по тепловому расчету поверхностных конденсаторов мощных турбин тепловых и атомных электростанций: РД 34.30.104–81. – М.: Союзтехэнерго, 1982. – 106 с.
8. Методические указания по прогнозированию химического состава и накипеобразующих свойств охлаждающей воды электростанций: РД 34.37.307–87. – М.: Союзтехэнерго, 1989. – 22 с.
9. Технический отчет по испытаниям и эксплуатации системы шариковой очистки конденсатора 180-КЦС-1 турбины Т-180/210-130 ЛМЗ Гомельской ТЭЦ-2. – Гомель: Гомельская ТЭЦ-2, 2007. – 36 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. Z e n o v i c h - L e s h k e v i c h - O l ' p i n s k i y, 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).
2. *A d j u s t i n g the Ball-Cleaning System of the Condenser of Turbine K-300-240 LMZ of Lukoml' GRES Block 1. Technical Report.* Moscow, Soyuztekhenergo, 1988. 55 p. (in Russian).
3. *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, Soyuztekhenergo, 1990. 68 p. (in Russian).
4. Z e n o v i c h - L e s h k e v i c h - O l ' p i n s k i y, 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).
5. *E n e r g y Characteristics of the Gomel TPP-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).
6. Z e n o v i c h - L e s h k e v i c h - O l ' p i n s k i y, 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).
7. 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, Soyuztekhenergo, 1982. 106 p. (in Russian).
8. RD 34.37.307–87. Instructional Guidelines on Prognostication of the Chemical Composition and Scale-Forming of the Power Plants Cooling Water. Moscow, Soyuztekhenergo, 1989. 22 p. (in Russian).
9. *T e c h n i c a l Report on Testing and Exploiting of the Ball-Cleaning System for Condenser 180-KTsS-1 of Turbine T-180/210-130 LMZ in Gomel CHP-2.* Gomel, Gomel CHP-2, 2007. 36 p. (in Russian, unpublished).
10. T u m a n o v s k i y, A. G., Ivanov, Yu. G., & Boldyrev, N. V. (2011) Efficiency of the Ball-Cleaning System Employment for the Steam Turbine Condenser. *Novosti Teplosnabzheniia* [Heat-Supply News], 7, 29–32 (in Russian).

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 20.05.2014

УДК 532.5.013.12+532.5.011.1

ОБЩЕЕ УРАВНЕНИЕ ЗАКОНА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ СТЕСНЕННОМ ПАДЕНИИ ОДИНОЧНОГО ШАРА И ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ В ЗЕРНИСТЫХ СЛОЯХ

Кандидаты техн. наук, доценты **КРАВЦОВ М. В.**, КРАВЦОВ А. М.

Белорусский государственный аграрный технический университет

E-mail: arkravt@mail.ru

Приводятся результаты исследований различных гидромеханических процессов (стесненное падение одиночного шара в жидкости, взвешивание однородного монодисперсного зернистого слоя восходящим потоком жидкости, фильтрация однородной жидкости в пористом зернистом слое). Путем обобщения результатов теоретических и экспериментальных исследований с использованием теории подобия установлено, что законы гидравлических сопротивлений для данных гидромеханических процессов имеют общую основу и описываются общим уравнением, на основе которого получены частные формулы для расчета исследованных гидромеханических процессов. Формулы представлены в безразмерных критериях подобия, которые отражают соотношение основных действующих сил.

Представленные научные результаты вносят вклад в развитие теории прикладных гидромеханических явлений, а полученные новые формулы дают возможность для совершенствования методик расчетов сооружений и установок, в которых реализуются исследованные гидромеханические процессы. Так, результаты исследований стесненного падения одиночного шара в жидкости могут быть использованы в технике вискозиметрии и при решении задач, связанных с расчетами различных видов движения и отдельных узлов в технологиях, в которых реализуются гидравлические процессы стесненного падения одиночных шаров в жидкостях.

Процессы взвешивания (псевдооживления) зернистых слоев широко применяются в различных отраслях промышленности, например в химических технологиях при адсорбции, десорбции, растворении, выщелачивании, отмывке. Появление новой общей расчетной формулы дает возможность осуществлять технологические расчеты при любых режимах работы. Процесс фильтрации используется в промышленности, а также встречается в природных условиях, например при движении грунтовых вод. В настоящее время основой для методик расчетов служит одночленная формула Дарси, определяющая скорость фильтрации в зависимости от гидравлического уклона при введении коэффициента фильтрации. При этом возникают проблемы с определением режимов фильтрации и пределов применимости формулы Дарси. Появление общей формулы, предлагаемой в статье, решает данную проблему и позволяет производить расчеты с высокой точностью в широком диапазоне изменяющихся условий.

Ключевые слова: уравнение закона гидравлического сопротивления, одиночный шар, движение жидкости, зернистый слой.

Ил. 5. Библиогр.: 12 назв.

GENERAL EQUATION OF THE HYDRAULIC FRICTION LAW FOR HINDERED FALLING OF AN INDIVIDUAL BALL AND FLUID MOTION IN GRANULAR LAYERS

KRAUTSOV M. V., **KRAUTSOV A. M.**

Belorussian National Technical University

The article presents the results of a research into various hydromechanical processes such as hindered falling of an individual ball in a liquid; suspension of a homogeneous monodispersed granular layer with ascending fluid flow; homogeneous liquid filtration in a porous granular layer. The authors generalize the results of theoretical and experimental studies, employ the theory of similarity, and establish that the laws of hydraulic friction for the mentioned hydromechanical processes share the common ground described by one general equation that provides basis for obtaining the individual formulae computing the studied hydromechanical processes. The formulae appear in dimensionless similitude parameters that reflect correlation of the essential action forces.

The presented scientific results contribute to the theory development of the applied hydromechanical phenomena and the new obtained formulae enable enhancement of the calculation procedures for structures and installations that realize the studied hydromechanical processes. Thus, the research results for the hindered falling of an individual ball in a liquid can apply in viscosimetry techniques and in handling the problems related to calculations of various movement types and separate units in technologies realizing the hydraulic processes of hindered falling of individual balls in liquids.

Fluidization processes (pseudo-liquefaction) of the granular layers enjoy wide application in various segments of industry for instance in chemical engineering at adsorption, desorption, dissolution, dealkalization, ablation. A new general calculating formula incipency provides a possibility for technological computations realization under any operational mode. The filtration process is used in industry as well as occurs in nature, for example, in movement of the ground water. At present, the basis for calculating techniques is the monomial Darcy formula defining the filtering rate as function of the hydraulic gradient with bringing in the filtration coefficient. Thereat, the problems appear with determination of the filtration regime and the validity limits for the Darcy's equation. The incipency of the proposed in the article new general formula resolves this problem and allows estimating with high accuracy in a wide range of changing conditions.

Keywords: the equation of the hydraulic friction law, an individual ball, liquid motion, the granular layer.

Fig. 5. Ref.: 12 titles.

В настоящее время во многих отраслях техники имеют дело с обтеканием жидкостью движущихся или покоящихся одиночных тел и зернистых материалов. Во всех случаях при гидравлических расчетах необходимо определять различные параметры, которые находятся в зависимости от величин гидравлических сопротивлений. Использовать для этих целей известные дифференциальные уравнения гидродинамики невозможно, так как они не замкнуты (искомых параметров больше имеющихся уравнений). Поэтому для замыкания дифференциальных уравнений требуются дополнительные зависимости, которые, как правило, не представляется возможным вывести теоретическим путем в силу многофакторности и недостаточной изученности гидромеханических процессов. Их можно получить лишь из опыта при наблюдении за движением реальной жидкости, а затем из обобщения результатов опытных наблюдений.

Существенно облегчить подготовку экспериментальных исследований и обобщение опытных данных позволяет применение теории подобия.

Теория подобия определяет такую совокупность условий, подлежащих выполнению при экспериментальных исследованиях гидромеханических процессов, которая обеспечивает возможность правильного обобщения их результатов [1]. Использование безразмерных критериев подобия позволяет получить форму закона гидравлических сопротивлений при ограниченном числе опытов. Кроме того, анализ закономерностей, в которых действующие силы представлены в критериальной форме, дает возможность легко проследить за соотношениями этих сил при реализации конкретных процессов. Решение задач с использованием теории подобия состоит в определении основных закономерностей течения жидкостей, установлении зависимостей для расчета касательных напряжений, определении расчетных коэффициентов, входящих в соответствующие формулы, а также в определении самих характеристик потоков жидкости. Именно таким путем в данной статье раскрываются основные законы гидравлических сопротивлений для ряда гидромеханических процессов: стесненное осаждение одиночных шаров, взвешивание (псевдооживление) зернистых материалов восходящим потоком воды, фильтрация жидкости в однородных монодисперсных зернистых материалах. Для этих целей приводится систематизированный перечень критериев подобия, использование которых позволило получить ряд искомых закономерностей и дать их экспериментальное обоснование.

Рассмотрим только равномерное движение в направлении оси x . Тогда компонент скорости частицы жидкости в направлении оси x обозначим через u , а среднюю скорость натекающей на тело жидкости – через v . Расчетные формулы для различных случаев движения получим путем комбинации действующих сил, выраженных через безразмерные критерии подобия. Сформируем эти критерии из действующих в каждом конкретном случае сил, отнесенных к единице объема, через характерные длины, скорости и т. д. За характерную длину можно принять, например, диаметр тела d , а за характерную скорость – скорость потока жидкости v . Свойства жидких сред и тел, обтекаемых жидкостью, обозначим: ρ_t и ρ – плотность тела и жидкости; μ – динамический коэффициент вязкости жидкости; g – ускорение свободного падения тел.

Представим перечень сил, которые могут действовать в конкретных случаях [1–3]. Выражение для силы трения T , отнесенной к единице объема, легко получить, если рассматривать элемент жидкости, ось x которого расположена по направлению его движения. Тогда разность сил сдвига, возникающих при движении такого элемента, будет равна

$$\left(\tau + \frac{\partial \tau}{\partial y} dy \right) dx dz - \tau dx dz = \frac{\partial \tau}{\partial y} dx dy dz,$$

откуда и получаем выражение для силы трения на единицу объема в следующем виде:

$$T = \frac{\partial \tau}{\partial y}.$$

В соответствии с гипотезой Ньютона касательные напряжения трения

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}.$$

С учетом этого получим

$$T = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}. \quad (1)$$

Выражением силы инерции I на единицу объема будет произведение массы на ускорение. Если u есть компонент скорости частицы жидкости в направлении оси x , то соответствующим компонентом ускорения при установившемся движении будет $u \frac{\partial u}{\partial x}$. Следовательно, сила инерции на единицу объема

$$I = \rho u \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (2)$$

К силам трения T и инерции I добавим силу тяжести G и эффективный вес $G_{\text{эф}}$, отнесенные к единице объема:

$$G = \rho g; \quad (3)$$

$$G_{\text{эф}} = (\rho_{\text{т}} - \rho) g = \Delta \rho g. \quad (4)$$

Из названных сил сформулируем комбинированные безразмерные соотношения (критерии подобия). Используя эти соотношения, решим вопрос, как изменяются действующие силы, когда изменяются величины, характеризующие рассматриваемое явление: скорость движения натекающей на тело жидкости v ; размер тела, например диаметр d ; плотность ρ и динамический коэффициент вязкости жидкости μ .

Очевидно, что для механически подобных течений скорость частицы жидкости u в любой точке объема движущейся жидкости пропорциональна скорости невозмущенного течения v . Поэтому, обозначая знаком « $\sim$ » пропорциональность двух величин, можно написать

$$u \sim v.$$

Разности скоростей в соседних точках также пропорциональны скорости v

$$du \sim v.$$

Теперь, если учесть, что для механически подобных течений вокруг геометрически подобных тел разности координат каждой двух подобно расположенных соседних точек пропорциональны соответствующим линейным размерам геометрически подобных тел (например, в случае падения шаров – их диаметрам), то оказывается, что изменение компонента скорости жидкости в направлении оси x в какой-нибудь точке течения,

т. е. $\frac{\partial u}{\partial x}$, пропорционально $\frac{v}{d}$ и, следовательно, сила инерции I пропор-

циональна $\frac{\rho v^2}{d}$. Так как по тем же основаниям

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \approx \frac{v}{d^2},$$

то сила трения пропорциональна $\frac{\mu v}{d^2}$ и для отношения силы инерции к силе трения получаем:

$$\frac{I}{T} = \frac{\rho u \frac{\partial u}{\partial x}}{\mu \frac{\partial u^2}{\partial y^2}} = \frac{\rho v^2}{\frac{\mu v}{d^2}} = \frac{v d \rho}{\mu} = \text{Re}, \quad (5)$$

где Re – это число Рейнольдса.

Таким образом, в (5) представлен первый безразмерный критерий подобия для геометрически и механически подобных потоков, характеризующий отношение силы инерции к силе трения. Найдем теперь выражение закона подобия для действующих сил инерции I и тяжести G . В этом случае должно быть одинаково отношение этих сил

$$\frac{I}{G} = \frac{\rho u \frac{\partial u}{\partial x}}{\rho g}. \quad (6)$$

Ранее было установлено, что $u \frac{\partial u}{\partial x}$ изменяется пропорционально $\frac{v^2}{d}$ (где v – характерная скорость течения, а d – характерный линейный размер). Следовательно, (6) можно представить

$$\frac{I}{G} = \frac{v^2}{dg} = \text{Fr}, \quad (7)$$

где Fr – число Фруда (критерий Фруда), используется там, где проявляется действие силы тяжести.

Рассмотрим еще несколько комбинаций единичных сил, из которых конструируются известные безразмерные величины (критерии подобия). Часто в гидромеханике используют сложные критерии. Например, когда при движении тела в жидкости определяющими являются силы вязкости и тяжести, комбинируют критерии Рейнольдса и Фруда, получая критерий Галилея, в котором учтены силы G , I и T :

$$\text{Ga} = \frac{\text{Re}^2}{\text{Fr}} = \frac{G}{T} \frac{I}{T} = \frac{\rho g d^2}{\mu v} \frac{\rho v^2 d^2}{d \mu v} = \frac{d^3 \rho^2 g}{\mu^2}. \quad (8)$$

Известно, что при свободном равномерном падении одиночного шара в вязкой несжимаемой жидкости эффективный вес $G_{\text{эф}}$ уравнивается силой инерции I (обе силы рассматриваются отнесенными к единице объема), т. е.

$$\frac{G_{\text{эф}}}{I} = \frac{\Delta p dg}{\rho v^2} = \frac{\Delta p}{\rho Fr} = \psi, \quad (9)$$

где $\frac{\Delta p}{\rho} = \frac{\rho_{\text{т}} - \rho}{\rho}$ – симплекс Архимеда; ψ – коэффициент сопротивления.

Поиск расчетной формулы коэффициента сопротивления ψ составляет одну из главных проблем гидромеханики. Многие ученые прилагали усилия для раскрытия функции $\psi = f(\text{Re})$. Этот многотрудный путь пока не привел к желаемым результатам.

Критерий Архимеда Ar получается, если критерий Галилея (8) помножить на симплекс Архимеда. Тогда

$$\text{Ar} = \text{Ga} \frac{\Delta p}{\rho} = \frac{d^3 \rho^2 g}{\mu^2} \frac{\Delta p}{\rho} = \frac{d^3 \Delta p \rho g}{\mu^2}. \quad (10)$$

С учетом (5) и (9) критерий Архимеда может быть представлен в следующем виде:

$$\text{Ar} = \frac{3}{4} \psi \text{Re}^2. \quad (10^*)$$

В соответствии с обобщением результатов теоретических и экспериментальных исследований [2–11] установлено, что законы гидравлических сопротивлений для рассматриваемых гидромеханических процессов имеют общую основу и описываются следующим уравнением:

$$\text{Re} = \frac{\frac{4}{3} \text{GaKr} (1 - K_{\text{ст.1}}^2)}{\frac{a}{(1 - K_{\text{ст.2}})^2} + b \sqrt{\frac{4}{3} \text{GaKr}}}, \quad (11)$$

где Re , Ga – соответственно критерии Рейнольдса и Галилея, которые учитывают главные действующие силы – трения, инерции и тяжести; Kr – критерий, учитывающий дополнительные действующие силы при реализации определенного гидромеханического процесса; $K_{\text{ст.1}}$, $K_{\text{ст.2}}$ – коэффициенты стеснения; a , b – коэффициенты, учитывающие влияние разного вида сопротивлений (определяются опытным путем).

Для подтверждения права на существование общего закона в виде формулы (11) рассмотрим несколько примеров гидравлических явлений, связанных с падением одиночных шаров в ограниченном стенками объеме вязкой несжимаемой жидкости, взвешиванием слоев зернистых однородных монодисперсных частиц восходящим потоком жидкости (псевдооживление) и движением жидкости в порах зернистых монодисперсных неподвижных слоев (фильтрация). Из общего вида закона гидравлических сопротивлений (11) частные законы для отдельных видов движения получаются путем учета дополнительных действующих сил и граничных условий (определяют значения параметров Kr , $K_{\text{ст.1}}$ и $K_{\text{ст.2}}$). Так, при падении в жидкости одиночного шара в стесненных стенками условиях [7] $\text{Kr} = \Delta p / \rho$; $K_{\text{ст.1}} = K_{\text{ст.2}} = d/D$ (d и D – диаметр шара и сосуда соответственно). В этом случае с учетом (10) формула (11) принимает вид

$$Re = \frac{\frac{4}{3} Ar \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)}{\frac{a}{\left(1 - \frac{d}{D}\right)^2} + b \sqrt{\frac{4}{3} Ar}}. \quad (12)$$

В результате обработки опытных данных определены постоянные коэффициенты в (12): $a = 20,6$; $b = 2/3$. Результаты сопоставлений расчетных по (12) и опытных данных [5] для случая стесненного падения шаров в воде и водоглицериновых растворах представлены на рис. 1, 2.

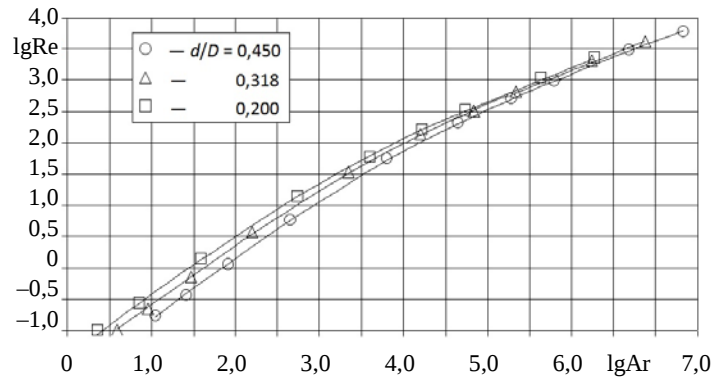


Рис. 1. Сопоставление расчетных по (12) (линии) и опытных данных [5] (точки) стесненного осаждения одиночных шаров в водно-глицериновых растворах при постоянном отношении d/D

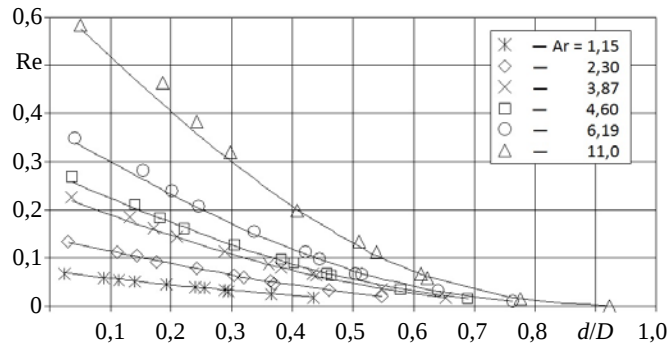


Рис. 2. Сопоставление расчетных по (12) (линии) и опытных данных [5] (точки) стесненного осаждения одиночных шаров в водно-глицериновых растворах при постоянном Ar

При взвешивании (псевдооживлении) слоев зернистых однородных монодисперсных частиц восходящим потоком жидкости в (11) следует принять [8]:

$$K_r = \frac{\Delta \rho_c}{\rho_c} = \frac{(1-c)(\rho_t - \rho)}{\rho_t c + \rho(1-c)}; \quad K_{ст.1} = \sqrt{\frac{3}{2} \beta c}; \quad K_{ст.2} = \sqrt{\frac{3}{2} \beta_0 c},$$

где $\Delta \rho_c = \rho_t - \rho_c$; ρ_t , ρ_c – плотности твердого зернистого материала и суспензии; c – объемная концентрация взвешенного зернистого материала;

β , β_0 – постоянные величины для среднестатистической формы частицы зернистого материала).

С учетом приведенных соотношений формула (11) приводится к виду

$$\text{Re} = \frac{\frac{4}{3} \text{Ar}' \left(1 - \frac{3}{2} \beta c\right)}{\frac{a}{\left(1 - \sqrt{\frac{3}{2}} \beta_0 c\right)^2} + b \sqrt{\frac{4}{3}} \text{Ar}'}, \quad (13)$$

где $\text{Ar}' = \text{Ga} \frac{\Delta \rho_c}{\rho_c}$ – модифицированный критерий Архимеда.

Обработка результатов опытных данных показала [8], что коэффициенты в формуле (13) следующие:

- для частиц естественных зернистых материалов (песок и гравий): $a = 15,5$; $b = 1,1$; $\beta = 0,725$; $\beta_0 = 0,5$;

- для частиц искусственно дробленых материалов с остроугольной формой (антрацит, керамзит и т. п.): $a = 59,8$; $b = 1,09$; $\beta = 0,890$; $\beta_0 = 0,315$.

Сопоставления расчетных и опытных данных из [8, 12] о взвешивании однородных монодисперсных зернистых слоев из частиц керамзита, кварцевого песка, гравия и антрацита приведены на рис. 3, 4. Во всех исследованных диапазонах (всего 439 опытных значений при концентрациях от 0,05 до 0,53) параметров взвешенных слоев для различных зернистых материалов относительные среднеарифметические погрешности не превысили 0,05 (5,00 %).

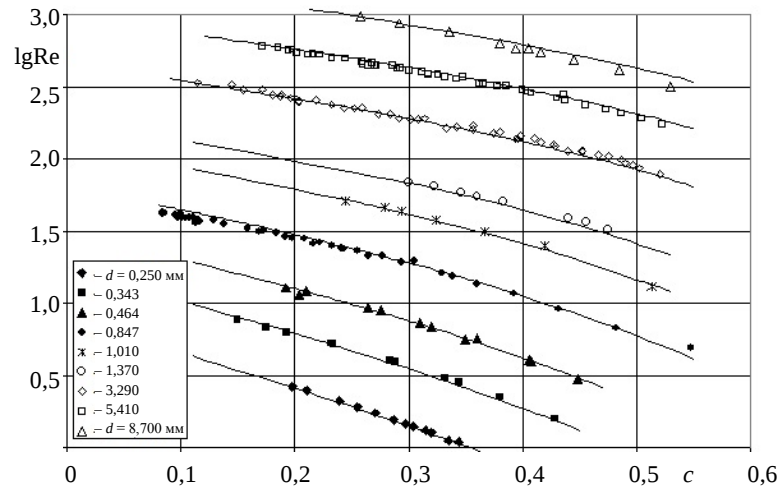


Рис. 3. Сопоставление расчетных по (13) (линии) и опытных данных [12] (точки) взвешивания зернистых слоев из частиц кварцевого песка и гравия ($\rho_r = 2470\text{--}2670 \text{ кг/м}^3$) в воде

При переходе от процесса взвешивания зернистых слоев (фильтрации жидкости в деформированной зернистой среде) к фильтрации жидкости в плотной зернистой среде общий вид зависимости сохранится. Однако при выборе безразмерных комплексов следует учесть, что в случае филь-

трации жидкости в плотной зернистой среде подъемная (архимедова) сила, обусловленная разностью плотностей твердого тела и жидкости ($\Delta\rho = \rho_t - \rho$), больше не оказывает влияния на ход процесса. Тогда как интенсивность взаимодействия, а следовательно, и гидравлический уклон i в значительной степени зависят от отношения пористости зернистой среды m к объемной концентрации частиц в слое зернистой загрузки $c = 1 - m$. Поэтому заменим симплекс $Kr = \Delta\rho c / \rho$ в (13) на безразмерный комплекс $Kr = iC$ (здесь $C = m/c = (1 - c)/c$).

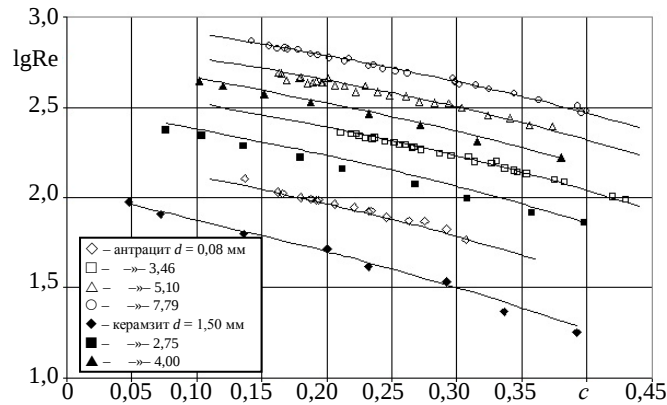


Рис. 4. Сопоставление расчетных по (13) (линии) и опытных данных (точки) взвешивания зернистых слоев из частиц антрацита [12] ($\rho_t = 1661 \text{ кг/м}^3$) и керамзита [8] ($\rho_t = 1900 \text{ кг/м}^3$) в воде

С учетом вышеизложенного в случае фильтрации воды через неподвижные пористые монодисперсные зернистые среды обобщенная формула (11) принимает вид [9]

$$Re = \frac{\frac{4}{3} GaiC \left(1 - \frac{3}{2} \beta c\right)}{\frac{a}{\left(1 - \sqrt{\frac{3}{2}} \beta_0 c\right)^2} + b \sqrt{\frac{4}{3} GaiC}}. \quad (14)$$

Или, решив уравнение (14) относительно i и v с учетом (5), получим:

$$i = \frac{3}{4} \frac{C}{Ga} \left(\frac{b Re + \sqrt{b^2 Re^2 + 4a Re \frac{2 - 3\beta c}{(\sqrt{2} - \sqrt{3\beta_0 c})^2}}}{2 - 3\beta c} \right)^2; \quad (15)$$

$$v_\phi = \frac{\frac{4}{3} \frac{\mu}{d_p \rho} GaiC \left(1 - \frac{3}{2} \beta c\right)}{\frac{a}{\left(1 - \sqrt{\frac{3}{2}} c \beta_0\right)^2} + b \sqrt{\frac{4}{3} GaiC}}, \quad (16)$$

где v_ϕ – скорость фильтрации.

В (14)–(16) коэффициенты β и β_0 постоянны для заданного вида зернистого материала и отражают влияние формы частиц. В результате обработки опытных данных о фильтрации воды в плотных зернистых средах из песка, гравия, антрацита [5, 12] и керамзита [9] оказалось, что постоянные коэффициенты a , b , β и β_0 в (14)–(16) равны:

- для песка и гравия: $a = 27,0$; $b = 1,91$; $\beta = 0,725$; $\beta_0 = 0,5$;
- для частиц дробленых материалов с остроугольной формой (антрацит, керамзит и т. п.): $a = 91,5$; $b = 1,67$; $\beta = 0,89$; $\beta_0 = 0,315$.

Сопоставление расчетных по (15) и опытных данных о фильтрации воды в плотных зернистых средах из частиц гравия, антрацита и керамзита, по данным исследований авторов статьи, показало, что относительные среднеарифметические отклонения равны:

- 0,046 – для гравия (по 29 опытным точкам при $i = 0,0598$ – $5,28$);
- 0,053 – для антрацита (по 148 опытным точкам при $i = 0,00188$ – $6,36$);
- 0,028 – для керамзита (по 40 опытным точкам при $i = 0,175$ – $4,78$).

Всего при сопоставлениях использовано 217 опытных значений при изменении гидравлических уклонов i от 0,00188 до 6,36. Сопоставления показали, что общая формула (15) обеспечивает высокую точность расчетов во всем исследованном диапазоне гидравлических уклонов и для различных видов зернистых материалов. Сопоставительные графики приведены на рис. 5.

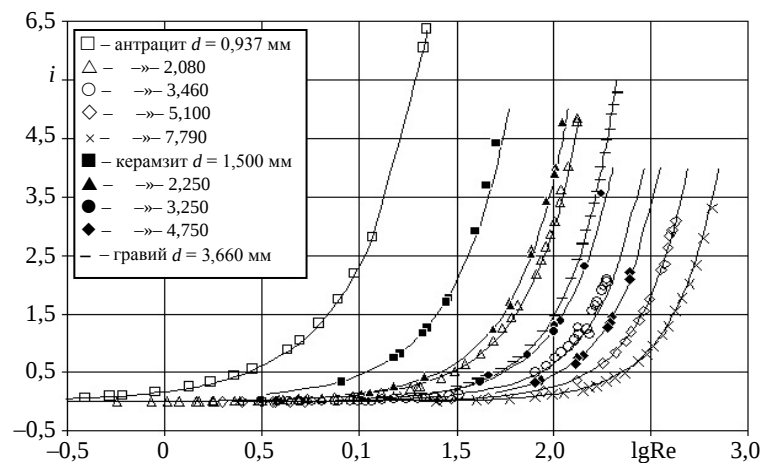


Рис. 5. Сопоставление расчетных по (15) (линии) и опытных данных (точки) о фильтрации воды в плотных зернистых средах из частиц гравия и антрацита [5, 12], керамзита [9]

Отметим, что при расчетах скоростей фильтрации однородных жидкостей по (16) для полидисперсных зернистых материалов следует знать также эффективный диаметр частиц и объемную концентрацию, значения которых могут уточняться на основе изучения гранулометрического состава и пористости среды в лабораторных условиях. Опытным путем установлено [5], что песок и гравий при монодисперсной зернистой среде образуют пористую среду с объемной концентрацией 0,525–0,608, а антрацит, керамзит и т. п. – 0,450–0,480. Поэтому для расчетов скоростей фильтрации однородных жидкостей в пористых средах по (16) можно принять макси-

мальные значения объемной концентрации (минимальные значения пористости): для частиц песка и гравия $c = 0,608$; для частиц дробленых материалов с остроугольной формой (антрацит, керамзит и т. п.) $c = 0,480$.

С получением общей формулы (14) для расчетов установившегося равномерного фильтрационного потока в плотной пористой зернистой среде отпадает необходимость использования для практических расчетов частных формул со всеми проблемами, связанными с определением постоянных коэффициентов в них, пределов их применения и т. д. При использовании общей формулы возрастает точность практических расчетов параметров фильтрационного потока.

ВЫВОДЫ

На основе систематизации и обобщения результатов исследований различных гидромеханических процессов (стесненное падение одиночного шара в жидкости, взвешивание однородного монодисперсного зернистого слоя восходящим потоком жидкости, фильтрация однородной жидкости в пористом зернистом слое) предложены общий вид закона сопротивлений и частные формулы с учетом граничных условий. Полученные зависимости могут использоваться для расчетов технологических параметров аппаратов и сооружений в различных отраслях техники, а также при развитии теоретических основ гидромеханики.

ЛИТЕРАТУРА

1. П р а н д т л ь, Л. Гидро- и аэромеханика: в 2 т. / Л. Прандтль, О. Титъенс. – М.: ОНТИ-НКТП СССР, 1935. – Т. 2. – 283 с.
2. К р а в ц о в, М. В. К вопросу моделирования процессов осаждения взвесей / М. В. Кравцов // Энергетика... Изв. высш. учеб. заведений. – 1976. – № 4. – С. 112–115.
3. K r a v t s o v, M. V. Modeling of Settling of Suspended Solids / M. V. Kravtsov // Fluid Mechanics, Soviet Research. – 1976. – Vol. 5, № 4. – С. 12–17.
4. К р а в ц о в, М. В. Стесненное осаждение твердых сферических частиц / М. В. Кравцов // Водное хозяйство Белоруссии. – 1974. – Вып. 4. – С. 80–89.
5. К р а в ц о в, М. В. Гидравлика зернистых материалов / М. В. Кравцов. – Минск: Наука и техника, 1980. – 168 с.
6. К р а в ц о в, М. В. О свободном падении одиночного тела в жидкостях / М. В. Кравцов, А. М. Кравцов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1999. – № 5. – С. 86–94.
7. К р а в ц о в, А. М. Ротаметрические измерения расходов и свойств жидкостей / А. М. Кравцов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2003. – № 6. – С. 76–82.
8. К р а в ц о в, А. М. Расчет промывки зернистой загрузки фильтра восходящим потоком воды / А. М. Кравцов // Вестник БНТУ. – 2004. – № 5. – С. 27–31.
9. К р а в ц о в, А. М. Фильтрация воды в слое однородной зернистой загрузки / А. М. Кравцов // Вестник БНТУ. – 2005. – № 1. – С. 26–30.
10. К р а в ц о в, М. В. Характер движения и скорости свободно падающих одиночных шаров в жидкостях / М. В. Кравцов, А. М. Кравцов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2011. – № 2. – С. 80–87.
11. K r a v t s o v, M. V. Laws of Free Fallen Single Spheres in Fluids / M. V. Kravtsov, A. M. Kravtsov // American Journal of Fluid Dynamics. – 2013. – No 3 (4). – P. 96–100.
12. М и н ц, Д. М. Гидравлика зернистых материалов / Д. М. Минц, С. А. Шуберт. – М.: Изд-во МКХ РСФСР, 1955. – 112 с.

REFERENCES

1. P r a n d t l', L., & Tit'ens, O. (1935) *Hydro- and Aeromechanics*. Vol. 2. Moscow, ONTI-NKTP USSR. 283 p. (in Russian).
2. K r a v t s o v, M. V. (1976) On the Issue of Simulation of the Suspension Sedimentation Processes. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii – Energetika* [Proceedings of Higher Education Institutions – Energetika], 4, 112–115 (in Russian).
3. K r a v t s o v, M. V. (1976) Modeling of Settling of Suspended Solids. *Fluid Mechanics, Soviet Research*, 5 (4), 12–17.
4. K r a v t s o v, M. V. (1974) Hindered Settling of the Solid Spherical Particles. *Vodnoe Khoziaistvo Belorussii* [Water Industry of Byelorussia], 4, 80–89 (in Russian).
5. K r a v t s o v, M. V. (1980) *Hydraulics of the Particulate Materials*. Minsk, Nauka i Tekhnika. 168 p. (in Russian).
6. K r a v t s o v, M. V., & Kravtsov, A. M. (1999) On the Free Sedimentation of an Individual Object in the Liquids. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG – Energetika* [Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Energetika], 5, 86–94 (in Russian).
7. K r a v t s o v, A. M. (2003) High-Pressure Measuring of the Flow-Rates and Liquid Properties. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG – Energetika* [Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Energetika], 6, 76–82 (in Russian).
8. K r a v t s o v, A. M. (2004) The Computation of the Granulate-Load Filter Sluicing with Ascendant Water Flow. *Vestnik BNTU* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], 5, 27–31 (in Russian).
9. K r a v t s o v, A. M. (2005) Water Filtration in the Layer of Homogeneous Granulate Loads. *Vestnik BNTU* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], 1, 26–30 (in Russian).
10. K r a v t s o v, M. V., & Kravtsov, A. M. (2011) The Character of Movement and Speed of Individual Balls Free-Falling in the Liquids. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG – Energetika* [Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Energetika], 2, 80–87 (in Russian).
11. K r a v t s o v, M. V., & Kravtsov, A. M. (2013) Laws of Free Fallen Single Spheres in Fluids. *American Journal of Fluid Dynamics*, 3 (4), 96–100. Doi:10.5923/j.ajfd.20130304.02.
12. M i n t s, D. M., & Shubert, S. A. (1955) *Hydraulics of the Particulate Materials*. Moscow, MKKh RSFSR Press. 112 p. (in Russian).

Представлена кафедрой гидравлики
и гидравлических машин

Поступила 21.08.2014