

Том. 20 № 5-6/2018 ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ  
СОДЕРЖАНИЕ  
ЭНЕРГЕТИКА

ЧЕТОШНИКОВА Л.М., СМОЛЕНЦЕВ Н.И., ЧЕТОШНИКОВ С.А., ГУСАРОВ Г.В. Автономные системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии и умной сетью. ....	3
ГРАЧЕВА Е.И., САФИН А.Р., САДЫКОВ Р.Р. Исследование и оценка функциональных параметров низковольтных аппаратов. ....	13
ГИЛЬФАНОВ К.Х., ЯКИМОВ Н.Д., МИНВАЛЕЕВ Н.Ю., ШЕШУКОВ Е.Г., БОГДАНОВА Н.В. Нестационарные трение и теплообмен в начальном участке трубопровода при сбросе тепловой нагрузки. ....	22
АМИНОВ Р.З., ПОРТЯНКИН А.В. Анализ компоновочных решений электролизного цеха водородной надстройки с учетом надежности и взрывопожароопасности. ....	29
АСАНОВ М.М. Влияние положения пластин абсорбера на эффективность работы солнечного коллектора. ....	37

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

САВЕНКО А.Е., САВЕНКО П.С. Влияние люфта на амплитуду обменных колебаний мощности в автономных электротехнических комплексах. ....	46
--	----

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ЛИСИЦКИЙ К.Е. Совершенствование методов и средств оценки фликера при использовании источников света с разной чувствительностью к колебаниям напряжения в электрической сети. ....	55
САДЫКОВ М.Ф., ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ А.В., АНДРЕЕВ Н.К. Применение в системах автопилотирования транспорта аппаратно-программных комплексов эмуляции двигателя и трансмиссии. ....	67
ТАЗЕЕВ И.Р., ГАПОНЕНКО С.О., КОНДРАТЬЕВ А.Е., ЗАМАЛИЕВ А.Н. Моделирование установки для балансировки ротора в программном комплексе ANSYS. ....	75
ГОРБУНОВА О.А., ПАВЛОВ Г.И. Разработка экспериментально- теоретической модели шумового поля энергетического оборудования ТЭС. ....	84
ГАТИЯТОВ И.З., САБИТОВ Л.С. Способы и установки контроля опор из трубчатых стержней, применяемых в энергетическом строительстве при воздействии на них статических и динамических нагрузок. ....	93

ФИЗИКА

АХМЕТЛАТЫЙПОВА Д.Д., ГУМЕРОВ Ф.М., ТЕЛЯКОВ Э.Ш. Эффективность использования сверхкритической экстракционной технологии при выделении оксида этилена. . .	102
НИКИТИН А.С., БОРИСОВ А.Н. Фазово-изотропный уголкового отражатель для волоконно-оптического преобразователя. ....	110
ПОГОРЕЛЬЦЕВ А.И., МАТУХИН В.Л., САФОНОВА О.А., ШАРИПОВА А.Р., ИСЛАМОВА Г.Н., ШМИДТ Е.В., ШУЛЬГИН Д.А. Топологические особенности распределения электронной плотности в ковеллине: положение Cu1. ....	118
РАЗИНА А.Г., КАЗАКОВ В.А., АШМАРИН А.А., КОЧАКОВ В.Д. Исследование состава пленочной системы Pb-SE и изменений ее структуры под действием температуры. ....	129
СЕМЕНОВА Е.В., ЛАРИОНОВ В.М., ВАНЬКОВ Ю.В. Термодинамический и акустический анализ пульсационного горения твердого топлива в устройстве типа резонатора Гельмгольца. ....	141

**C O N T E N T S**

**POWER ENGINEERING**

CHETOSHNIKOVA L.M., SMOLENTSEV N.I., CH.OSHNIKOV S.A., GUSAROV G.V. Autonomous power supply systems with renewable sources of energy and smart grid. . . . .	3
GRACHEVA E.I., SAFIN A.R., SADYKOV R.R. Research and evaluation of functional parameters of low voltage devices. . . . .	13
GILFANOV K.H., YAKIMOV N.D., MINVALEEV N.Y., SHESHUKOV E.G., BOGDANOVA N.W. Unsteady friction and heat transfer in the initial pipeline section at the reset of thermal load. . . . .	22
AMINOV R.Z., PORTYANKIN A.V. Analysis of layout solutions of electrolysis shop of hydrogen superstructure taking into account the reliability and explosion risk. . . . .	29
ASANOV M.M. Absorber plates position influence on solar collector operation efficiency. . . . .	37

**ELECTRICAL ENGINEERING**

SAVENKO A.E., SAVENKO P.S. Influence of backlash on amplitude of exchange power fluctuations in autonomous electric power equipment. . . . .	46
--	----

**INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-  
MEASURING DEVICES AND SYSTEMS**

LISITSKIY K.E. Improvement methods and means of flearer evaluation when using light sources with different sensitivity to voltage fluctuations in the electrical network . . . . .	55
SADYKOV M.F., GOLENISHCHEV-KUTUZOV A.V., ANDREEV N.K. Hardware and software engine emulation in the autopilot systems. . . . .	67
TAZEYEV I.R., GAPONENKO S.O., KONDRATIEV A.E., ZAMALIEV A.N. Modeling of the machine for the balancing of the rotor in the ANSYS software complex. . . . .	75
GORBUNOVA O.A., PAVLOV G.I. Development of an experimental -theoretical model for the noise field of thermal power plant equipment. . . . .	84
GATIYATOV I.Z., SABITOV L.S. Methods and systems control the supports of the tubular rods used in the energy construction when exposed to static and dynamic loads. . . . .	93

**PHYSICS**

AKCHMETLATYYPOVA D.D., GUMEROV F.M., TELYAKOV E.SH. Efficiency of the use of supercritical extraction technologie in the recovery of ethylene oxide. . . . .	102
NIKITIN A.S., BORISOV A.N. Phase-isotropic corner reflector for fiber-optic converter. . . . .	110
POGORELTSEV A.I., MATUKHIN V.L., SAFONOVA O.A., SHARIPOVA A.R., ISLAMOVA G.N., SHMIDT E.V., SHUL'GIN D.A. Topological features of the electron density distribution in covellite: position Cu1. . . . .	118
RAZINA A.G., KAZAKOV V.A., ASHMARIN A.A., KOCHAKOV V.D. Study of composition film system PB-SE and change of structure under temperature action . . . . .	129
SEMENOVA E.V., LARIONOV V.M., VANKOV YU.V. Thermodynamic and acoustic analysis of the solid fuel pulsating combustion in a Helmholtz resonator type device . . . . .	141

# ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.1(031)

## АВТОНОМНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ И УМНОЙ СЕТЬЮ

Л.М. Четошникова<sup>1</sup>, Н.И. Смоленцев<sup>1</sup>, С.А. Четошников<sup>2</sup>, Г.В. Гусаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, Россия

<sup>2</sup>Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия  
ORCID: orcid.org/0000-0001-6483-4053, chlm56@mail.ru

*Резюме:* Использование в системах электроснабжения современных устройств и технологий позволит обеспечить потребителей качественной энергией. Особенно эффективно в этом направлении будет построение автономных систем с использованием возобновляемых источников энергии и локальных интеллектуальных сетей. Решить вопросы согласованности работы всех элементов систем и оптимального управления энергопотоками позволят методы математического моделирования.

*Ключевые слова:* автономная система электроснабжения, возобновляемые источники энергии, интеллектуальная сеть, оптимальное управление, математическая модель.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-3-10

## AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS WITH RENEWABLE SOURCES OF ENERGY AND SMART GRID

L.M. Chetoshnikova<sup>1</sup>, N.I. Smolentsev<sup>1</sup>, S.A. Ch.oshnikov<sup>2</sup>,  
G.V. Gusarov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Branch of State Educational Institution South Ural State University, Miass, Russia

<sup>2</sup>State Educational Institution South Ural State University, Chelyabinsk, Russia  
ORCID: orcid.org/0000-0001-6483-4053, chlm56@mail.ru

*Abstract:* The use of modern devices and technologies in power supply systems will provide consumers with high-quality energy. Especially effective in this direction will be the construction of autonomous systems using renewable energy sources and local smart grids. The coordinated work of all elements of systems and optimal control of energy flows is solved by mathematical modeling methods.

*Keywords:* autonomous power supply system, renewable energy sources, smart grid, optimal control, mathematical model.

В последние годы в отечественной электроэнергетике произошли изменения, заставляющие пересматривать требования как к инфраструктуре, так и объектам электроэнергетики. Среди прочих чаще всего указывается на увеличивающийся износ основных

средств, что требует привлечения новых инвестиций на замещение выбывающих мощностей и строительство новых. При этом без изменения существующей структуры мощностей и практики их использования новые инвестиции неизбежно приведут к росту цены на энергию для потребителей. Современные технологии и устройства, такие как микрогенерация, автономные источники и накопители энергии, средства регулирования нагрузки, оперативное интеллектуальное управление и др., формируют новые модели поведения потребителей и требования к доступности, надежности и качеству электрической энергии.

Актуальность обеспечения все возрастающего спроса на качественную электроэнергию и снижения нагрузки на окружающую среду привели к необходимости создания новой инфраструктуры на принципах интеграции в сеть распределенной генерации, накопителей, микросетей, создания виртуальных электрических станций для снижения пика резерва мощности в системе. Предпринимаются попытки использования умной сети в системе электроснабжения потребителей. В настоящее время мероприятия по поддержанию соответствия предложения растущему спросу на энергию могут быть не только затратными, но и неэффективными при длительной эксплуатации. Поэтому цель умной сети – это не только соответствие предложения спросу, но и наоборот, приведение в соответствие спроса имеющемуся предложению с использованием современных технологий и заинтересованности потребителей через оптимальное ценообразование [1].

Для обеспечения повышенного спроса на электроэнергию энергоснабжающие компании отслеживают его и задействуют мощность дополнительных ресурсов, например, пиковых электростанций. При этом вовлечение дополнительных ресурсов генерации энергии требует больших капитальных вложений и оперативного расширения части компаний. Если для производства энергии применяют традиционные источники, то они еще могут оказывать неблагоприятное воздействие на окружающую среду.

Доля этих источников может быть сокращена путем выравнивания графика потребления электрической энергии. Теоретически добиться усреднения спроса можно за счет мотивации частных потребителей регулировать спрос на электроэнергию с последующим их поощрением. В этом состоит ключевая идея поддержания умной сети: стимулировать потребителей снижать или увеличивать энергопотребление в соответствии с предложением в то или иное время суток. Реализация данной идеи возможна путем разработки системы ценообразования, а также доступности энергии от собственных ветровых или солнечных электростанций. Это не только улучшит оперативную эффективность энергоснабжающих компаний, но также поможет избежать капитального инвестирования для генерирования дополнительной энергии, снизить зависимость от углеводородного топлива, что в итоге приведет к сокращению отрицательного влияния на окружающую среду.

Применяемая в настоящее время сеть состоит из следующих главных элементов (рис. 1): генерационной системы, системы распределения электроэнергии (шины распределительных подстанций), системы передачи (воздушные и кабельные линии) и потребителей. Генерационная система может состоять из совокупности разных источников.

Интеллектуальная сеть дает разнообразные возможности каждому потребителю через оптимальное управление электропитанием уравнивать энергию в системе, связанной с собственными источниками энергии, нагрузкой (потреблением) и хранением с использованием энергоемких батарей.

На рис. 2 показана модель системы с локальными источниками и потребителями, объединенными через микросеть. В такой системе сведения об уровне потребления энергии отдельными нагрузками и о выработке электроэнергии распределенными генераторами (РГ) передаются в управляющий центр, осуществляющий оптимальное регулирование и распределение мощности между потребителями.

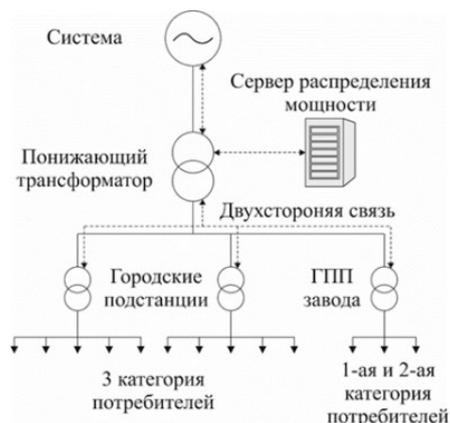


Рис. 1. Элементы электрической сети

Система генерации для питания потребителей представляет собой несколько альтернативных источников. Чаще всего это ветроэнергетическая установка (ВЭУ), солнечные батареи (СБ), а также дизель- или бензогенераторная установка.

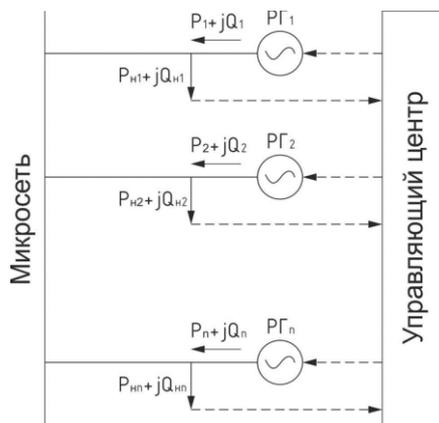


Рис. 2. Модель системы с локальными источниками и потребителями

При избытке вырабатываемой мощности указанные источники обеспечивают питанием балластную нагрузку, а также зарядку аккумуляторных батарей (АБ). При отсутствии ветра и солнца в работу будут введены аккумуляторные батареи, чтобы работать на полную нагрузку. Сложность состоит в том, что при использовании возобновляемых источников энергии выработка ими электроэнергии носит случайный характер, зависящий от климатических факторов, погодных условий в данной местности, времени года, суток и др. [2]. Индивидуальные потребители также имеют неравномерный суточный график потребления. Возможность разнести во времени производство и потребление электроэнергии путем ее накопления в больших масштабах – один из наиболее эффективных путей решения проблемы покрытия пиков потребления. В связи с этим требуется наличие емких накопителей энергии и средств контроля за вырабатываемой и потребляемой мощностями.

Для примера на рис. 3–5 [3] представлены графики вырабатываемой энергии ВЭУ, солнечной батареей и график потребления электроэнергии нагрузкой. Для согласования режимов работы элементов микросети необходимо разработать математическую модель.

Генерация электроэнергии от солнечных батарей смоделирована как источник энергии, чей выход может контролироваться. Максимальный выход энергии зависит от времени. При расчете могут быть использованы значения солнечной радиации, измеренной на ближайшей метеостанции. Графики, характеризующие поступление солнечной энергии в течение трех дней, показаны на рис. 3.

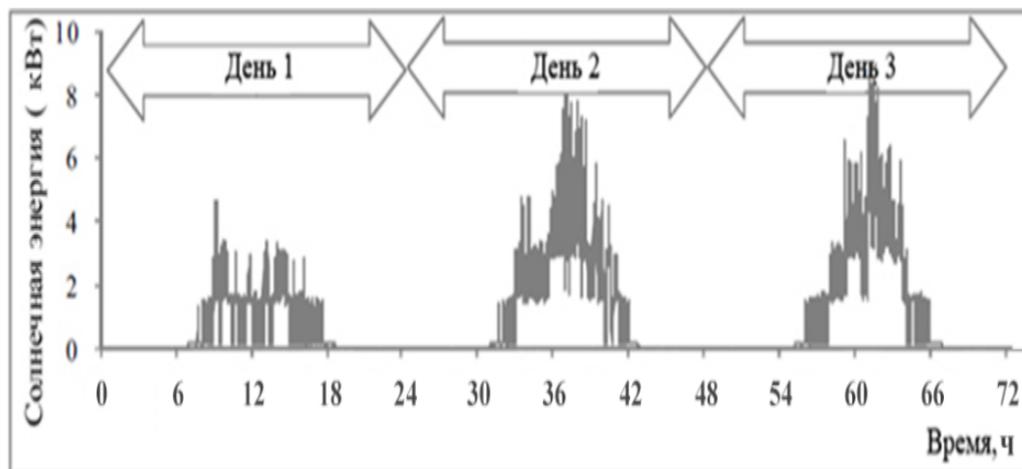


Рис. 3. Поступление солнечной энергии

Выработка энергии ветроустановками в течение трех дней показана на рис. 4. График построен на основании измерений скорости ветра, которые соответствуют данной местности. Выход энергии ветра регулируется изменением угла атаки относительно лопастей ветряка. Также предполагается, что соотношение между углом атаки, скоростью ветра и выходом энергии ветрогенератора известны.

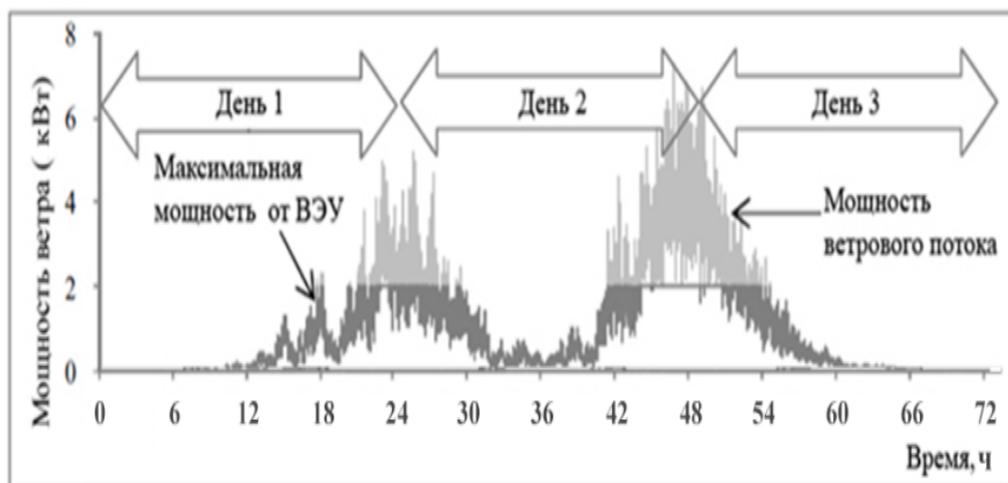


Рис. 4. График выработки энергии ветроустановкой

Разнообразие неконтролируемых нагрузок за период трех дней показано на рис. 5. Выбранный для изучения график соответствует нагрузке потребителей для трех произвольных дней. Предполагается также, что в нагрузку включена зарядка аккумуляторов.

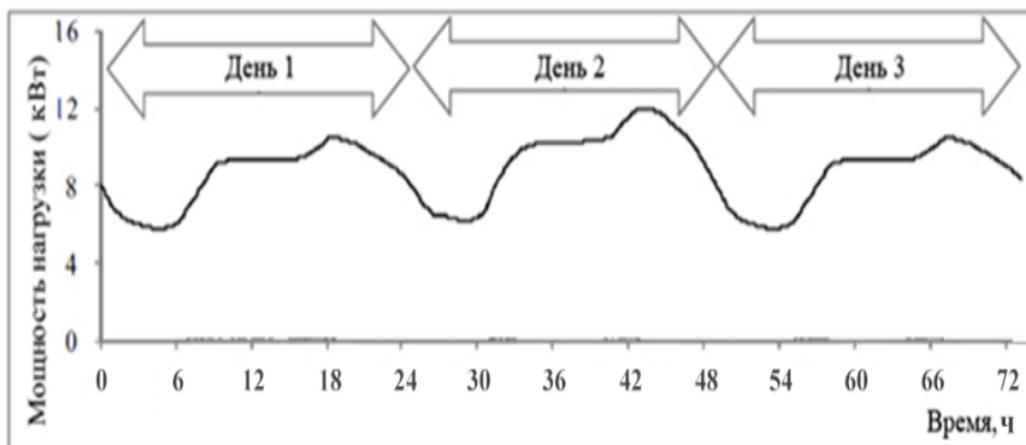


Рис. 5. График потребления нагрузки

Аккумуляторные батареи вносят значительный вклад в процесс регулирования и контроля энергии. Для того, чтобы обеспечить удобство для пользователя, аккумулятор заряжается до 90% от максимального уровня. Процесс зарядки и разрядки аккумуляторов для трех дней показан на рис. 6.

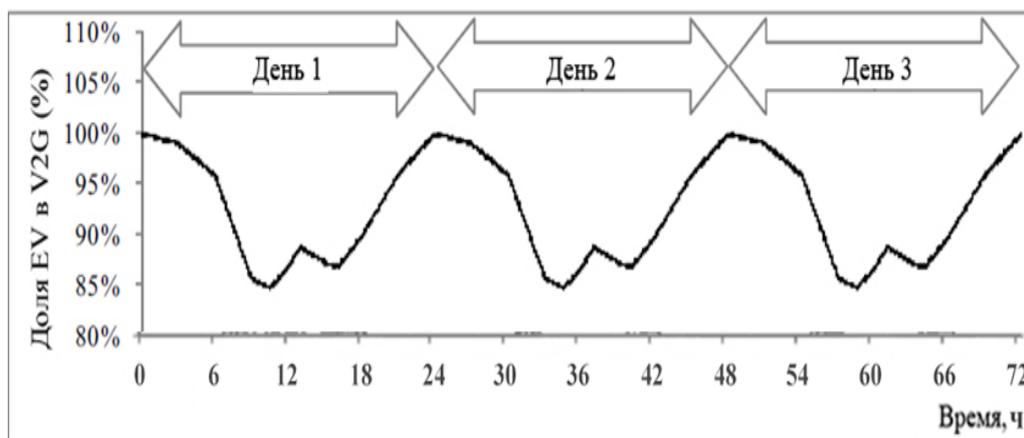


Рис. 6. Процесс зарядки-разрядки аккумуляторов

Для решения задачи оптимального управления вводятся характерные параметры, которые следует контролировать в процессе работы ( $X_i$ ). С точки зрения наибольшей информативности для определения состояния автономной сети используют следующие параметры:  $P_{ВЭУ}$  – мощность, вырабатываемая ВЭУ;  $P_H$  – мощность нагрузки автономной сети;  $U_B$  – напряжение на АБ;  $Q_B$  – величина заряда батарей;  $P_{СБ}$  – мощность, вырабатываемая солнечными панелями. Эти параметры являются входными переменными для модели системы.

Кроме того, необходимо учесть возмущающие воздействия  $Z_i$ , которые не поддаются контролю, следовательно являются случайными или меняющимися во времени (скорость ветра, инсоляция, температура воздуха и др.). Наличие таких случайных возмущений усложняет задачу оптимального управления и требует статистических методов для определения динамических характеристик системы [4].

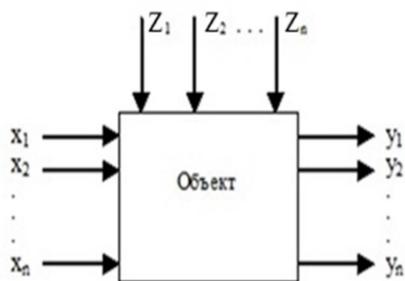


Рис. 7. Структурная схема объекта исследования

Для оценки влияния внешних климатических факторов обычно применяют методы описательной статистики, которые используют комбинацию двух основных подходов: 1) усреднение в пределах длительных интервалов времени (например, среднемесячные и среднегодовые значения); 2) использование статистических распределений, параметры которых также получены усреднением по времени, например, описание ветровых режимов распределением Вейбулла.

Ветрогенератор в модели, как электрическая машина на постоянных магнитах, описывается системой уравнений, заданной в осях  $q$  и  $d$  [5]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} u_d - \frac{R}{L_d} i_d - \frac{L_q}{L_d} p \omega_r i_q, \\ \frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} u_q - \frac{R}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_d - \frac{\lambda p \omega_r}{L_q}, \\ T_e = 1,5 p [\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q], \\ \frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{J} (T_e - F \omega_r - T_m), \\ \frac{d}{dt} \vartheta = \omega_r, \end{cases} \quad (1)$$

где  $L_q, L_d$  – индуктивности статора по осям  $q$  и  $d$ ;  $R$  – сопротивление обмотки статора;  $i_q, i_d$  – проекции тока статора на оси  $q$  и  $d$ ;  $U_q, U_d$  – проекции напряжения статора на оси  $q$  и  $d$ ;  $\omega_r$  – угловая частота вращения ротора;  $\lambda$  – магнитный поток постоянных магнитов;  $p$  – число пар полюсов;  $T_e$  – электромагнитный момент;  $J$  – суммарный момент инерции ротора и нагрузки;  $F$  – коэффициент трения;  $\theta$  – угол ротора;  $T_m$  – момент сопротивления.

Значение средней производительности ВЭУ с номинальной мощностью  $P_{ВЭУ}$ , начальной скоростью ветроколеса  $v_0$ , номинальной скоростью  $v_{ном}$  и предельной скоростью  $v_{макс}$  определяется по формуле

$$\bar{A} = \frac{\bar{v}_p^3}{v_{ном}^3} \cdot P_e \cdot T, \quad (2)$$

где  $\bar{v}_p^3 = \bar{v}_n^3 \left[ I(x_{\text{ном}}, m) - I(x_0, m) + I(x', m) \right]$  – средний куб скорости в диапазоне рабочих скоростей ( $v_{\text{макс}} > v \geq v_0$ );  $I(x, m) = \frac{1}{\Gamma(m)} \int_0^x e^{-t} t^{m-1} dt$  – неполная гамма-функция;  $x = \left( \frac{v}{\beta} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$ ;  $m = \frac{3}{\gamma} + 1$ ;  $\beta, \gamma$  – параметры функции Вейбулла;  $\Gamma(m)$  – полная гамма-функция.

Вычислить значения неполной гамма-функции  $I(x_{\text{ном}}, m)$ ,  $I(x_0, m)$  и  $I(x', m)$  можно, воспользовавшись справочными таблицами либо специализированными программами через разложение в ряд, либо выражение через непрерывные дроби (в зависимости от значений аргументов) [6].

Модель ветроустановки на постоянных магнитах получает входной сигнал механического момента от ветроколеса. Выводы фаз подключаются к нагрузке. В данной модели роль нагрузки исполняет активная трехфазная нагрузка. В дальнейшем трехфазный ток будет выпрямлен для возможности передачи мощности на шину постоянного тока.

Для расчета тока и напряжения на выходе солнечной батареи воспользуемся формулами:

$$I_d = I_0 \left[ e^{\frac{U_d}{U_T}} - 1 \right]; \quad (3)$$

$$U_T = \frac{kT}{q} \times nl \times N_{\text{cell}}, \quad (4)$$

где  $I_d$  – ток диода (А);  $U_d$  – напряжение диода (В);  $I_0$  – ток насыщения (А);  $k$  – постоянная Больцмана ( $1,3806 \cdot 10^{-23}$  Дж·К<sup>-1</sup>);  $q$  – заряд электрона ( $1,6022 \cdot 10^{-19}$  Кл);  $T$  – температура элемента (К);  $N_{\text{cell}}$  – число элементов в модуле [7].

Мощность солнечной батареи РСБ определяется произведением тока на напряжение:

$$P_{\text{СБ}} = I_d U_T. \quad (5)$$

Модель комбинированной установки, включающей в себя локальные источники энергии и нагрузку, показана на рис. 8. Математическая модель реализована с использованием программного обеспечения из пакета *MATLAB-Simulink* [8]. Модель позволяет оценить влияние входных и возмущающих воздействий на ток и напряжение на выходе системы.

В данной модели энергия, поступающая от ВЭУ и солнечных батарей, накапливается в аккумуляторной батарее, выполняющей роль нагрузки. Для моделирования батареи используется стандартный блок “*Battery*” из библиотеки *Simulink* с напряжением 48 В и емкостью 100 А·ч. Зарядка производится через простейший контроллер, отключающий батарею от сети при полной зарядке. В качестве выпрямителя используется диодный мост с LC-фильтром [9–11].

Использование в исследованиях метода математического и компьютерного моделирования позволяет заменить реальную систему автономного электроснабжения упрощенной копией и, тем самым, предсказать характер и ход изменения выходных параметров при изменении входных и возмущающих факторов. Этот метод наиболее эффективен, когда входные параметры носят случайный характер и для описания процессов используются вероятностно-статистические модели.

Результаты комплексных исследований при различном сочетании возмущающих факторов могут быть использованы при проектировании и эксплуатации автономных систем электроснабжения и определении наилучшего (наиболее оптимального) решения из множества допустимых решений.

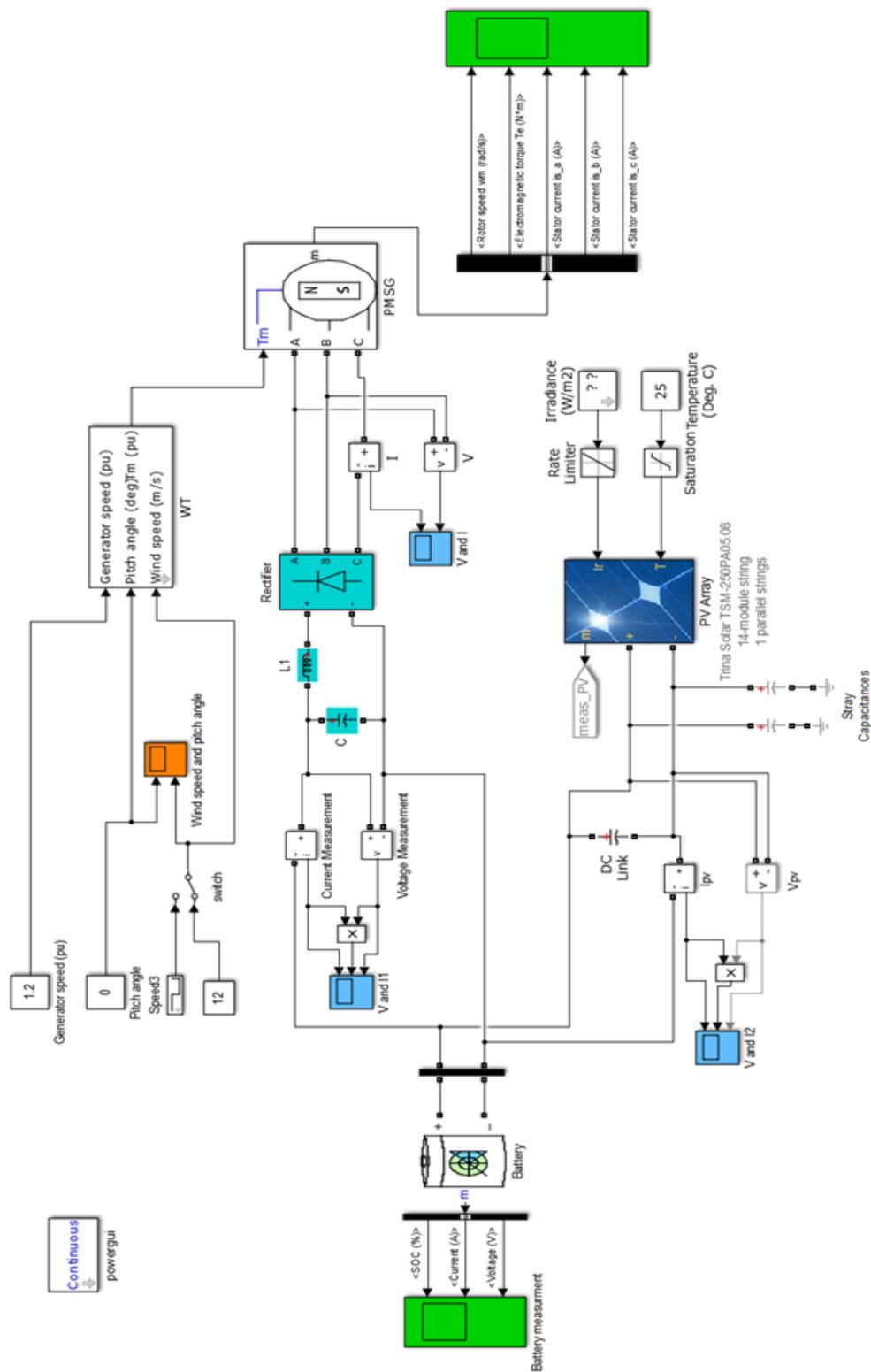


Рис. 8. Модель комбинированной ветро-солнечной установки

### Литература

1. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SmartGrid. М.: ИАЦ Энергия. 2010. 208 с.
2. Щеклеин С.Е., Власов В.В. Моделирование нестационарных случайных процессов в задачах обоснования возобновляемых источников энергии // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2012. № 03 (107). С. 67–71.
3. Liyanage K.M., Yokoyama A., Ota Y., Nakajima T., Taniguchi H. Impacts of Communication Delay on the Performance of a Control Scheme to Minimize Power Fluctuations Introduced by Renewable Generation under Varying V2G Vehicle Pool Size // 1<sup>st</sup> IEEE International Conference on Smart Grid Communications, Gaithersburg, Maryland, USA, 2010. С. 85–90.
4. Велькин В.И., Логинов М.И. Выбор оптимального состава оборудования в кластере возобновляемых источников энергии на основе регрессионного анализа // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2012. № 03 (107). С. 100–104.
5. Гапоненко А.М., Каграманова А.А. Методика и алгоритм математического анализа многофакторной модели оптимальной конфигурации нетрадиционных возобновляемых источников энергии // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. Вып. № 4 (46), ч. 2. С. 76–79.
6. Концепция использования ветровой энергии в России / Под ред. П.П. Безруких. М.: «Книга-Пента», 2005. 128 с.
7. Колосов Р.В., Пученкин А.В., Титов В.В., Титов В.Г. Возобновляемые источники энергии в системах малой генерации // Актуальные проблемы электроэнергетики. Материалы научно-технической конференции. Н. Новгород, 2013. С. 207–211.
8. Hui J., Bakhshai A., Jain P.K. A hybrid wind-solar energy system: A new rectifier stage topology // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE. IEEE, 2010. С. 155–161.
9. Fesli U., Bayir R., Özer M. Design and implementation of a domestic solar-wind hybrid energy system // Electrical and Electronics Engineering, 2009. ELECO 2009. International Conference on. IEEE, 2009. С. I–29–I–33.
10. Werner Kleinkauf, Gunther Cramer, Mohamed Ibrahim. PV System Technology. State of the Art Developments and Trends in Remote Electrification. SMA Catalogue, 2007–2008.
11. Кирпичникова И.М., Четошников С.А. Моделирование комбинированной ветро-солнечной установки // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2016. № 7–8 (195–196). С. 25–31.

### Авторы публикации

**Четошникова Лариса Михайловна** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Автоматика» филиала Южно-Уральского государственного университета в г. Миассе.

**Смоленцев Николай Иванович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматика» филиала Южно-Уральского государственного университета в г. Миассе.

**Четошников Сергей Александрович** – аспирант Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск.

**Гусаров Глеб Вадимович** – аспирант Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск.

### References

1. Kobets B.B., Volkova I.O. Innovatsionnoe razvitie elektroenergetiki na baze kontseptsii SmartGrid. M.: IATS Energiya. 2010. 208 p.
2. Scheklein S.E., Vlasov V.V. Modelirovanie nestatsionarnykh sluchaynykh protsessov v zadachakh

obosnovaniya vozobnovlyаемых istochnikov energii // Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Al'ternativnaya energetika i ekologiya». No. 03 (107). 2012. P. 67–71.

3. Liyanage K.M., Yokoyama A., Ota Y., Nakajima T., Taniguchi H. Impacts of Communication Delay on the Performance of a Control Scheme to Minimize Power Fluctuations Introduced by Renewable Generation under Varying V2G Vehicle Pool Size. 1st IEEE International Conference on Smart Grid Communications, Gaithersburg, Maryland, USA, 2010. P. 85–90.

4. Vel'kin V.I., Loginov M.I. Vybór optimal'nogo sostava oborudovaniya v klasterе vozobnovlyаемых istochnikov energii na osnove regressionnogo analiza. Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Al'ternativnaya energetika i ekologiya». No. 03 (107). 2012. P. 100–104.

5. Gaponenko A.M., Kagramanova A.A. Metodika i algoritm matematicheskogo analiza mnogofaktornoy modeli optimal'noy konfiguratsii netraditsionnykh vozobnovlyаемых istochnikov energii // Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. Iss. No. 4 (46), ch. 2. 2016. P. 76–79.

6. Kontseptsiya ispol'zovaniya vetrovoy energii v Rossii. /Pod red. P.P. Bezrukikh. M.: «Kniga-Penta», 2005. 128 p.

7. Kolosov R.V., Puchenkin A.V., Titov V.V., Titov V.G. Vozobnovlyаемые istochniki energii v sistemakh maloy generatsii. Aktual'nye problemy elektroenergetiki. Materialy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. N. Novgorod, 2013. P. 207–211.

8. Hui J., Bakhshai A., Jain P.K. A hybrid wind-solar energy system: A new rectifier stage topology. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE. IEEE, 2010. P. 155–161.

9. Fesli U., Bayir R., Özer M. Design and implementation of a domestic solar-wind hybrid energy system. Electrical and Electronics Engineering, 2009. ELECO 2009. International Conference on. IEEE, 2009. P. I–29–I–33.

10. Werner Kleinkauf, Gunther Cramer, Mohamed Ibrahim. PV System Technology. State of the Art Developments and Trends in Remote Electrification. SMA Catalogue, 2007–2008.

11. Kirpichnikova I.M., Chetoshnikov S.A. Modelirovanie kombinirovannoy vetro-solnechnoy ustanovki. Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Al'ternativnaya energetika i ekologiya». No. 7–8 (195–196). 2016. P. 25–31.

#### **Authors of the publication**

**Larisa M. Chetoshnikova** - Ph.D., Professor, Branch of State Educational Institution South Ural State University, Miass, Chelyabinsk Region, Russia.

**Nikolay I. Smolentsev** - Ph.D., Associate Professor, Branch of State Educational Institution South Ural State University, Miass, Chelyabinsk Region, Russia.

**Sergey A. Chetoshnikov** – postgraduate, State Educational Institution South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

**Gleb V. Gusarov** – postgraduate, State Educational Institution South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

*Поступила в редакцию*

*03 мая 2017 г.*

УДК 621.311

## ИССЛЕДОВАНИЕ И ОЦЕНКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОВОЛЬТНЫХ АППАРАТОВ

Е.И. Грачева, А.Р. Сафин, Р.Р. Садыков

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

**Резюме:** Для оценки работоспособности и технического состояния низковольтных коммутационных аппаратов предлагается использовать сопротивление контактных соединений. Вероятность безотказной работы предлагается оценивать зависимостью сопротивлений контактных соединений аппаратов от числа переключений. В результате износа начальное значение сопротивления контактов коммутационного аппарата увеличивается и достигает критического значения, при котором происходит отказ коммутационного аппарата.

В связи с тем, что в процессе исследований наблюдаются как полные отказы контактов, так и кратковременные – на время только лишь одного переключения, за отказ контакта принято превышение сопротивлением контактов порогового значения. Для магнитных пускателей, автоматических выключателей и контакторов по результатам проведенных экспериментальных исследований для достижения критического значения сопротивления аппарата принимается в среднем трехкратное увеличение начального сопротивления. При этом определение количественных характеристик эффективности функционирования осуществляется методами теории вероятности и математической статистики. Совокупность полученных количественных показателей позволяет определять фактический уровень надежности контактирования, а также расширяет возможности прогнозирования оценок работоспособности при проектировании.

В предлагаемой статье разработан метод комплексной оценки эффективности функционирования низковольтных аппаратов и выявлены законы изменения сопротивлений контактных соединений и вероятности безотказной работы низковольтных коммутационных аппаратов в зависимости от режимов эксплуатации.

**Ключевые слова:** функционирование, электроснабжение, вероятностные характеристики, электросеть, низковольтные аппараты, надежность.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-13-21

## RESEARCH AND EVALUATION OF FUNCTIONAL PARAMETERS OF LOW VOLTAGE DEVICES

E.I. Gracheva, A.R. Safin, R.R. Sadykov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

**Abstract:** To assess the operability and technical condition of low-voltage devices, it is proposed to use the resistance of contact connections. The probability of failure-free operation is proposed to be evaluated by the dependence of the resistance of the contact connections of the apparatus on the number of switching operations. As a result of wear, the initial value of the contact resistance of the switching device increases and reaches a critical value at which the switching device fails.

*Due to the fact that in the process of research there are both complete contact failures and short-term switching of only one time, the contact resistance is exceeded by the contact resistance of the threshold value. For magnetic starters, circuit breakers and contactors, based on the results of the experimental studies carried out, in order to achieve the critical resistance value of the apparatus, an average of three times the initial resistance. At the same time, the quantitative characteristics of the functioning efficiency are determined by the methods of probability theory and mathematical statistics. The set of the obtained quantitative indicators allows to determine the actual level of reliability of contacting, and also extends the possibility of predicting performance ratings in the design.*

*In the present article, a method for the complex evaluation of the efficiency of low-voltage apparatus has been developed and the laws of the change in the resistance of contact connections and the probability of failure-free operation of low-voltage switching devices have been revealed, depending on the operating conditions.*

**Keywords:** *functioning, electricity, probabilistic characteristics, power grid, low-voltage devices, power loss.*

Общеизвестно, что не все технические параметры серийных аппаратов приводятся в паспортных данных. В частности, не всегда указывается сопротивление их силовой цепи, сопротивления значительной части элементов электрических аппаратов.

Скорость износа контактов при коммутации определяет уровень надежности работы аппаратов. Основными факторами, которые непосредственно определяют скорость износа контактов и, следовательно, возможность возникновения отказа являются: величина тока и напряжения; характер нагрузки (с увеличением индуктивности коммутационной цепи износ контактов увеличивается); материал контактов, в том числе их размеры, форма, однородность структуры; время и амплитуда вибрации контактов в момент замыкания, жесткость контактных пружин и др. Все эти факторы функционально взаимосвязаны с тепловыми, электрическими и физико-техническими параметрами контактных материалов.

Анализ функциональных взаимосвязей указанных факторов и параметров, их систематизация дают возможность обосновать правомерность принятия некоторых критериев, определяющих показатели работоспособности контактных систем низковольтных электрических аппаратов. В качестве таких критериев могут быть представлены характерные зависимости изменения провала, суммарной высоты и массы контактов, сопротивления контактов от количества циклов.

Работоспособность контактов предложено оценивать зависимостью сопротивления контактных соединений аппаратов от числа переключений. Известно, что во время эксплуатации контакты изнашиваются. В результате износа начальное значение сопротивления контактов коммутационного аппарата  $R_0$  увеличивается и достигает критического значения  $R_{кр}$ , при котором происходит отказ коммутационного аппарата.

В связи с тем, что в процессе исследований наблюдаются как полные отказы контактов, так и кратковременные – на время только лишь одного переключения, за отказ контакта принято превышение сопротивлением контактов порогового значения [1; 2]. При этом для магнитных пускателей, автоматических выключателей и контакторов по результатам проведенных экспериментальных исследований для достижения критического значения сопротивления аппарата принимается в среднем трехкратное увеличение начального сопротивления:

$$R_{кр} = a \cdot R_0, \quad (1)$$

где  $a$  – коэффициент, зависящий от типа аппарата [3; 4].

Начальное значение сопротивления контактов коммутационного аппарата  $R_0$  вычисляется на основании выражений, представленных в работе [4].

При этом сопротивление контактов можно рассматривать как случайную функцию количества коммутационных циклов  $r(z)$  [3]:

$$r(z) = r_0 + \int_0^z v dz, \quad (2)$$

где  $r_0$  – начальное значение сопротивления контактов коммутационного аппарата;  $v$  – скорость изменения сопротивления контактов.

Ниже представлена методика оценки функциональных параметров низковольтных аппаратов. Результаты экспериментальных исследований [4] свидетельствуют о том, что изменение сопротивления контактов аппарата от количества коммутационных циклов можно с достаточной точностью аппроксимировать искомой зависимостью способом наименьших квадратов.

В соответствии с изложенным выражение (2) принимает вид:

$$r(z) = r_0 + vz. \quad (3)$$

Параметры  $r_0$  и  $v$  с достаточной степенью достоверности можно считать некоррелированными (независимыми) [4], так как  $r_0$  определяется качеством производственного процесса, а величина  $v$  для конкретной конструкции аппарата – совокупностью факторов эксплуатационного характера.

Установлено [2], что эмпирические функции сопротивлений контактов аппаратов аппроксимируются нормальным законом распределения. Функция  $r(z)$  в этом случае показана как функция веерная случайная. Начальная ордината принимается равной  $r_{0,ср}$ .

Таким образом, положение каждой реализации зависит от одной случайной величины – углового коэффициента  $v$ :

$$r_{0,ср} = \bar{r} + k \cdot \sigma_{м.в}, \quad (4)$$

где  $\bar{r} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n}$  – выборочная средняя величина;  $\sigma_{м.в} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2}{n-1}}$  – среднее

квадратическое отклонение малой выборки.

Коэффициент  $k$  зависит от количества испытанных образцов  $n$  и доверительной вероятности  $\alpha$ , с которой гарантируется получение  $r_{0,ср}$ .

Для конкретной коммутационной нагрузки скорость изменения сопротивления контактов зависит от большого количества факторов [5–8]:

- а) сопротивление контактов зависит от характера нагрузки;
- б) сопротивление может изменяться при переходе от одной контактной пары к другой, а также самопроизвольно при измерениях сопротивления одной и той же контактной пары в весьма широком диапазоне;
- в) кроме того, важно учитывать величину конечного и начального нажатий, вибрации, скорости движения, свойств материала, формы и размеров контактов, а также число манипуляций по переключению контактов и обмоток аппарата, изменение напряжения и тока. Таким образом, скорость изменения сопротивления контактов является вероятностно-статистической величиной.

Распределения указанных параметров, как показывает их статистическое исследование [2], описываются нормальными законами. Следовательно, и функция (скорость изменения сопротивления контактов) от аргументов, распределенных по нормальному закону, может быть принята также распределенной по аналогичному закону.

Поэтому для определения средней скорости изменения сопротивления всей генеральной совокупности аппаратов может быть использован изложенный метод [3].

Характеристика веерной случайной функции имеет вид

$$r_{\text{ср}}(z) = r_{\text{о.ср}} + v_{\text{ср}}z. \quad (5)$$

Вероятность безотказной работы контактов низковольтных коммутационных аппаратов за определенное количество коммутационных циклов находится по выражению

$$P(z) = 1 - F(z), \quad (6)$$

где  $F(z) = \int_0^z f(z)dz$  – вероятность ненадежной работы контактов (интегральный закон

распределения отказов);  $f(z)$  – плотность вероятности безотказно выполненных коммутаций (дифференциальный закон распределения отказов).

Вероятность исправной работы контактов аппарата определяется выражением

$$P(r) = \int_{r_0}^{r_{\text{кр}}} f(r)dr. \quad (7)$$

Нижний предел интегрирования  $r_0$  определяет среднее значение начального сопротивления контактов всей выборки значений, а верхний – среднее значение критического сопротивления  $r_{\text{кр}}$  всей выборки значений сопротивлений аппаратов.

Так как текущие значения  $r(z)$  распределяются по нормальному закону, то

$$P(r) = \int_{r_0}^{r_{\text{кр}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_r}} \exp\left[-\frac{(r - r_{\text{ср}})^2}{2\sigma_r^2}\right] dr, \quad (8)$$

где  $r_{\text{ср}}$  – среднее значение сопротивления контактов генеральной совокупности аппаратов;  $\sigma_r$  – среднее квадратическое отклонение сопротивления.

У некоррелированных веерных случайных функций средние квадратические отклонения практически линейно зависят от времени (для коммутационных аппаратов можно считать от количества циклов), т.е.

$$\sigma_r(z) = \sigma_v z, \quad (9)$$

где  $\sigma_v$  – среднее квадратическое отклонение углового коэффициента  $v$ .

Для определения плотности вероятности безотказно выполненных коммутаций  $f(z)$  необходимо продифференцировать выражение (7) по количеству циклов. Вместо  $r$  и  $\sigma_r$  подставляются значения  $r(z)$  и  $\sigma_r(z)$  из соотношений (1) и (7). Значение  $dr/dz$  представляет собой среднюю скорость изменения сопротивления.

Из выражения (2)

$$dr = vdz, \text{ или } dr = \frac{r - r_{\text{о.ср}}}{z} dz. \quad (10)$$

Таким образом, после дифференцирования и преобразований получим:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_v z^2}} \left\{ 3\sigma_{r_0} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma_{r_0}}{\sigma_v z} + \frac{v_{\text{ср}}}{\sigma_v}\right)^2\right] + \right. \\ \left. + (r_{\text{кр}} - r_{\text{о.ср}}) \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{v_{\text{ср}}}{\sigma_v} - \frac{r_{\text{кр}} - r_{\text{о.ср}}}{\sigma_v z}\right)^2\right] \right\}. \quad (11)$$

Для практических расчетов можно упростить полученное выражение. Обозначим коэффициенты вариации скорости и начального сопротивления соответственно  $S$  и  $S_1$ , т.е.

$$S = \frac{\sigma_v}{v_{\text{ср}}}, \quad (12)$$

$$S_1 = \frac{\sigma_r}{r_{o.c.p}}, \quad (13)$$

$$\theta_1 = \frac{3S_1 \cdot r_{o.c.p}}{v_{cp}}, \quad (14)$$

$$\theta_2 = \frac{r_{kp} - r_{o.c.p}}{v_{cp}}. \quad (15)$$

Таким образом,

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi z^2}} \left\{ \frac{\theta_1}{S} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 + \frac{\theta_1}{z}}{S} \right)^2 \right] + \frac{\theta_2}{S} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 - \frac{\theta_2}{z}}{S} \right)^2 \right] \right\}. \quad (16)$$

Вероятность безотказной работы контактов определяется по выражению

$$P(z) = 1 - \int_0^z \frac{1}{\sqrt{2\pi z^2}} \left\{ \frac{\theta_1}{S} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 + \frac{\theta_1}{z}}{S} \right)^2 \right] + \frac{\theta_2}{S} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 - \frac{\theta_2}{z}}{S} \right)^2 \right] \right\} dz. \quad (17)$$

На сегодняшний момент развитие имитационных систем позволяет решать комплекс задач по моделированию сложных систем, в том числе и по оценке функциональных параметров низковольтных аппаратов. Применение систем моделирования позволяет снизить затраты на создание испытательного образца и оценить степень эффективности применения того или иного варианта схемы управления [9; 10].

Некоторые изготовители коммутационного оборудования применяют хорошо зарекомендовавшие себя программы и одновременно стремятся обеспечивать обмен исходными данными и результатами расчетов между моделями разных систем. Для этого используют интерфейсы, позволяющие реализовать обмен данными между моделями механических и регуляционных процессов уже на первой стадии разработки. Это дает возможность своевременно получать как можно более точную информацию о поведении коммутационной системы и непосредственно сопоставлять его с поведением физической системы [11–13].

Для моделирования и оценки функциональных параметров коммутационных систем низковольтных электрических аппаратов использовались блоки программы *Matlab* из библиотеки *Simulink*.

На рис. 1 показана модель для расчета вероятности времени безотказной работы низковольтных аппаратов. В нее входят параметры из выражения (17). Для задания необходимых значений используются блоки *Constant*, для совершения вычислительных

операций блоки *Fcn* (функция), *Product* (умножение) и *Sum* (сумма). Рассчитанные данные выводятся на осциллограф.

$$f(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi z^2}} ; \quad (18)$$

$$f(u_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi z^2}} ; \quad (19)$$

$$f(u_2) = -\frac{1}{2} \left( \frac{1 + \frac{\theta_1}{Z}}{s} \right)^2 ; \quad (20)$$

$$f(u_3) = -\frac{1}{2} \left( \frac{1 + \frac{\theta_2}{Z}}{s} \right)^2 ; \quad (21)$$

$$f(u_4) = \frac{\theta_2}{s} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 + \frac{\theta_2}{Z}}{s} \right)^2 \right]. \quad (22)$$

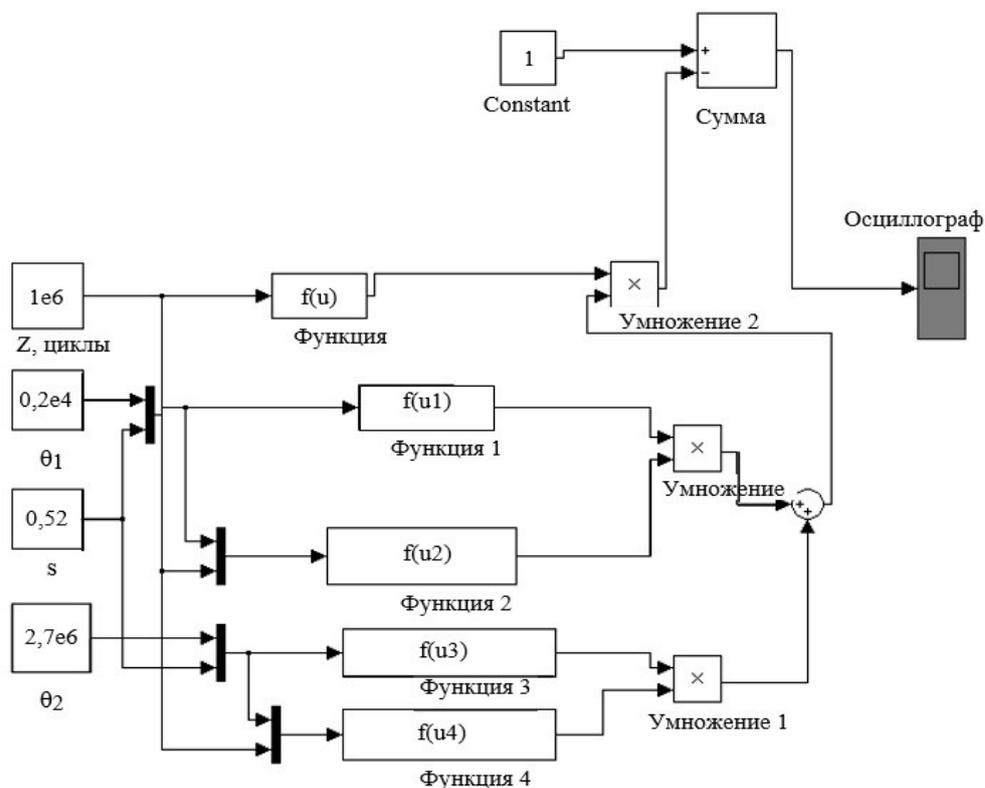


Рис. 1. Модель для расчета вероятности безотказной работы низковольтных аппаратов

На рис. 2 показаны, в соответствии с предлагаемым алгоритмом, зависимости изменения сопротивления контактов и вероятности безотказной работы контактов магнитных пускателей серии с номинальными токами 40; 63 и 80 А от количества коммутационных циклов. Аналогичные зависимости могут быть получены для автоматических выключателей и контакторов низкого напряжения.

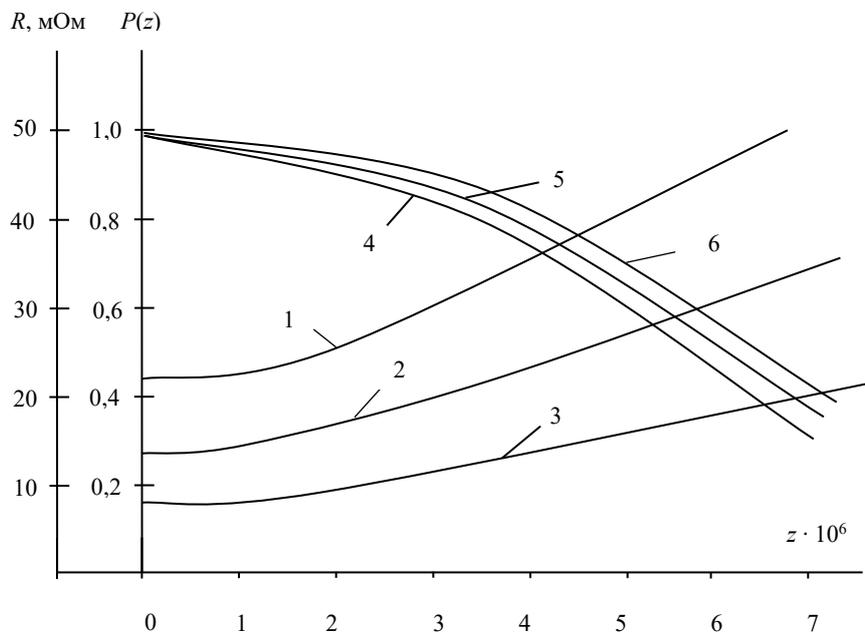


Рис. 2. Зависимость сопротивления контактов магнитных пускателей серии ПМЛ от количества коммутационных циклов: 1 –  $I_n = 40$  А; 2 –  $I_n = 63$  А; 3 –  $I_n = 80$  А; зависимость вероятности безотказной работы контактов магнитных пускателей серии ПМЛ от количества коммутационных циклов: 4 –  $I_n = 40$  А; 5 –  $I_n = 63$  А; 6 –  $I_n = 80$  А

### Выводы

1. Проведен комплексный анализ теоретических и экспериментальных значений сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов.

2. Проведена оценка величины сопротивлений контактных систем аппаратов с использованием нормального закона распределения.

3. В результате экспериментальных исследований предложен критерий оценки технического состояния низковольтных коммутационных аппаратов, в качестве которого выступает сопротивление контактных соединений, позволяющий учесть динамику изменения потерь мощности, и установлены коэффициенты кратности (превышения) значения сопротивления контактов по величине их допустимого перегрева относительно номинальных значений.

4. Разработан метод комплексной оценки эффективности функционирования низковольтных аппаратов и выявлены законы изменения сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов в зависимости от режимов эксплуатации.

### Литература

1. Шпиганович А.А. Анализ влияния вероятностных параметров электрооборудования на эффективность функционирования систем электроснабжения // Вести вузов Черноземья. 2013. № 2.

2. Грачева Е.И., Наумов О.В., Садыков Р.Р. Обработка статической информации с целью выявления законов изменения параметров оборудования цеховых сетей // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2016. № 2.
3. Грачева Е.И., Копытова Н.А. Анализ структуры систем цехового электроснабжения предприятий машиностроительной отрасли // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 5–6.
4. Грачева Е.И., Сафин А.Р. Реализация метода прогнозирования параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов // Промышленная энергетика. 2011. № 11.
5. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А. Оценка эффективности безотказности систем // Вести вузов Черноземья. 2013. № 1.
6. Шпиганович А.Н. Аспекты расчетов параметров электротехнических установок по условиям подobia // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2008. № 2.
7. Шпиганович А.А. Научно-технические основы анализа функционирования систем электроснабжения. Липецк: ЛГТУ, 2012.
8. Шпиганович А.А. Современные состояния вопросов безотказности систем электроснабжения. Липецк: ЛГТУ, 2012.
9. Конюхова Е.А. Электроснабжение: учебник для вузов. Москва: Издательский дом МЭИ, 2014.
10. Конюхова Е.А. Надежность электроснабжения промышленных предприятий. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001.
11. Akagi H. New Trends in Active filters for Power Conditioning. IEEE Transactions on industry applications. 1996. No. 6.
12. Yu-Long C., Hong W., Jing-Gin L. Simulation and reliability analysis of shunt active power there. Journal of Zhejiang University Science. 2007. No. 3.
13. Ajami A., Hosseini S.H. Implementation of a Novel Control Strategy for Shunt Active Filter. Ecti transactions on electrical end, communications. 2006. No. 1.

#### **Авторы публикации**

**Грачева Елена Ивановна** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: grachieva.i@bk.ru.

**Сафин Альфред Робертович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Садыков Руслан Рустемович** – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: ru059@mail.ru.

#### **References**

1. Shpiganovich A.A. Analiz vliyaniya veroyatnostnyh parametrov ehlektrooborudovaniya na ehffektivnost' funkcionirovaniya sistem ehlektrosnabzheniya // Vesti vuzov Chernozem'ya. 2013. No. 2.
2. Gracheva E.I., Naumov O.V., Sadykov R.R. Obrabotka staticheskoy informacii s cel'yu vuyavleniya zakonov izmeneniya parametrov oborudovaniya cekhovyh setej // Vesti vysshih uchebnyh zavedenij Chernozem'ya. 2016. No. 2.
3. Gracheva E.I., Kopytova N.A. Analiz struktury sistem cekhovogo ehlektrosnabzheniya predpriyatij mashinostroitel'noj otrasli // Problemy ehnergetiki. 2016. No. 5–6.
4. Gracheva E.I., Safin A.R. Realizaciya metoda prognozirovaniya parametrov nadezhnosti nizkovol'tnyh kommutacionnyh apparatov // Promyshlennaya ehnergetika. 2011. No. 11.

5. SHpiganovich A.N., SHpiganovich A.A. Ocenka ehffektivnosti bezotkaznosti sistem // Vesti vuzov Chernozem'ya. 2013. No. 1.

6. SHpiganovich A.N. Aspekty raschetov parametrov ehlektrotekhnicheskikh ustanovok po usloviyam podobiya // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2008. No. 2.

7. SHpiganovich A.A. Nauchno-tehnicheskie osnovy analiza funkcionirovaniya sistem ehlektrosnabzheniya. Lipeck: LGTU, 2012.

8. SHpiganovich A.A. Sovremennye sostoyaniya voprosov bezotkaznosti sistem ehlektrosnabzheniya. Lipeck: LGTU, 2012.

9. Konyuhova E.A. EHlektrosnabzhenie: uchebnik dlya vuzov. Moskva: Izdatel'skij dom MEHI, 2014.

10. Konyuhova E.A. Nadezhnost ehlektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatij. M.: NTF «EHnergoprogress», 2001.

11. Akagi H. New Trends in Active filters for Power Conditioning. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS. 1996. No. 6.

12. Yu-Long C., Hong W., Jing-Gin L. Simulation and reliability analysis of shunt active power there. Journal of Zhejiang University Science. 2007. No. 3.

13. Ajami A., Hosseini S.H. Implementation of a Novel Control Strategy for Shunt Active Filter. Ecti transactions on electrical end, communications. 2006. No. 1.

#### **Authors of the publication**

***Elena Gracheva*** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department "Power Supply of industrial enterprises" (EPP) Kazan state power engineering University (KSPEU).

***Alfred Safin*** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of "Power Supply of industrial enterprises" (EPP) Kazan state power engineering University (KSPEU).

***Ruslan Sadykov*** – postgraduate student, Department "Power Supply of industrial enterprises" (EPP) Kazan state power engineering University (KSPEU).

***Поступила в редакцию***

***23 ноября 2017 г.***

УДК 532.542

## НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТРЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН В НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ ТРУБОПРОВОДА ПРИ СБРОСЕ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ

К.Х. Гильфанов, Н.Д. Якимов, Н.Ю. Минвалеев, Е.Г. Шешуков, Н.В. Богданова

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

*Резюме:* Представлены результаты численного и экспериментального исследования пристенного трения и теплоотдачи в коротком цилиндрическом канале. Определены гидродинамические и тепловые характеристики нестационарного высокотемпературного газового потока. Результаты обобщены в рамках теории пограничного слоя.

*Ключевые слова:* цилиндрический короткий канал, начальный участок, высокотемпературный газ, нестационарность, коэффициент трения, коэффициент теплоотдачи, обобщение.

*DOI:* 10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-22-28

## UNSTEADY FRICTION AND HEAT TRANSFER IN THE INITIAL PIPELINE SECTION AT THE RESET OF THERMAL LOAD

K.H. Gilfanov, N.D. Yakimov, N.Y. Minvaleev, E.G. Sheshukov, N.W. Bogdanova

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

*Abstract:* The results of numerical and experimental study of wall friction and heat transfer in a short cylindrical channel are presented. Hydrodynamic and thermal characteristics of non-stationary high-temperature gas flow are determined. The results are summarized in the framework of boundary layer theory.

*Keywords:* cylindrical short channel, initial section, high-temperature gas, nonstationarity, coefficient of friction, coefficient of heat transfer, synthesis.

### Введение

Эффективность и ресурс использования энергетического оборудования во многом обусловлены интенсивностью протекающих в них гидромеханических и тепломассообменных процессов. Распространенным способом управления интенсивностью является создание нестационарных гидродинамических и тепловых условий. Нестационарные режимы также реализуются в тепловых двигателях, в проточных частях насосов и компрессоров, пневмо- и гидроприводах исполнительных устройств систем управления. Нестационарные процессы относятся к сложным физическим явлениям, при которых возникают неустановившиеся течения жидкостей или газов с изменением гидродинамических и тепловых величин не только во времени, но и по пространству, занятому потоком [1–3]. Такие режимы характеризуются возникновением и затуханием вихревых течений и переменной турбулентностью [4–6].

Для инженерных расчетов важным является знание динамических характеристик параметров течения и теплообмена, что позволяет оптимальным образом синтезировать комплекс технических решений.

Данная работа посвящена численному и экспериментальному исследованию вынужденного конвективного теплообмена в цилиндрических каналах, моделирующих проточные части энергетических установок в условиях сброса тепловой нагрузки по потоку при постоянном массовом расходе газа. При выключении энергетической установки температура теплоносителя падает, температура стенки постепенно уменьшается. Этот временной интервал часто называют сбросом тепловой нагрузки, которая соответствует IV участку на рис. 1.

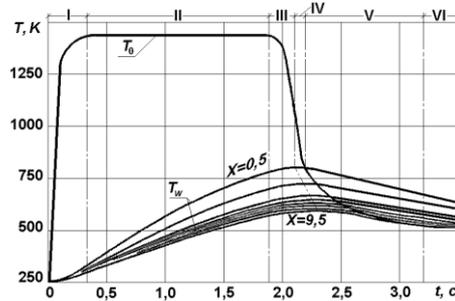


Рис. 1. Тренды температуры потока ( $T_0$ ) и обтекаемой поверхности ( $T_w$ ) от времени и продольной координаты

### Теоретическая часть

В основу математической модели положена теория пограничного слоя [7]. Система интегральных уравнений

неразрывности: 
$$4HRe^{**} = Re_{01}(W_0 - 1) - \frac{4r_0^2 \rho_0}{\mu_0 T_0} \frac{\partial T_0}{\partial t} X, \quad (1)$$

движения: 
$$\frac{\partial Re^{**}}{\partial X} + \frac{Re^{**}}{W_0} (1 + H) \frac{\partial W}{\partial X} = \frac{2r_0}{\omega_0 \mu_0} \left( \frac{C_f}{2} \rho_0 \omega_0^2 + P - \frac{\partial}{\partial t} \frac{\rho_0 \omega_0 \delta^*}{\phi_h} + \frac{1 - \phi_h}{\phi_h} \frac{\rho_0 \omega_0 \delta^*}{\omega_0} \frac{\partial \omega_0}{\partial t} \right), \quad (2)$$

и энергии: 
$$\frac{\partial Re_h^{**}(h_0 - h_w)}{\partial X} - \frac{\partial}{\partial X} \left[ h_0^* \frac{\rho_0 \omega_0 r_0}{\mu_0} \left( 1 - 2 \frac{\delta^*}{r_0} \right) \right] = \frac{q_w 2r_0}{\mu_0} + \frac{r_0^2}{2\mu_0} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_0 h_0^* - P) \quad (3)$$

с учетом допущения о подобии полей скоростей и энтальпий замыкаются соотношениями для коэффициентов трения и теплоотдачи в рамках двухслойной модели пограничного слоя [8]:

$$\frac{c_f}{2} = \left\{ \frac{\int_{\omega_1}^1 \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} d\omega}{\int_{\xi_1}^1 \sqrt{\frac{\tau}{\tau_0}}} \right\}, \quad St = \sqrt{\frac{c_f}{2} \frac{\int_{\theta_1}^1 \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} d\theta}{\int_{\xi_{h1}}^1 \frac{\bar{q}}{q_0} \sqrt{\frac{\tau}{\tau_0}} \frac{d\xi_h}{\xi_h}}}. \quad (4)$$

Структуры формул коэффициентов трения и числа Стантона подобны, что дает основание для записи их в одну строку.

Численное интегрирование системы уравнений по продольной координате при граничных условиях первого рода позволяет определить распределение кинематических, тепловых и интегральных характеристик, коэффициентов обмена по длине канала. Уравнения движения и энергии содержат члены, учитывающие изменение полного давления и энтальпии торможения по длине канала, поэтому математическая модель справедлива для начальных и стабилизированных участков течения. В рамках теории пограничного слоя для оценки эффектов нестационарности удобно пользоваться величинами, называемыми, соответственно, параметрами гидродинамической и тепловой нестационарности:

$$z = -\frac{2}{c_f} \frac{\delta}{\omega_0^2} \frac{\partial \omega_0}{\partial t}, \quad z_h = \frac{\delta_h}{St \phi_h \omega_0 (h_0^* - h_w)} \frac{\partial (h_0^* - h_w)}{\partial t}. \quad (5)$$

$$\Psi_{c_f} = \Psi_h \cdot \Psi_z, \quad \Psi_{St} = \Psi_h \cdot \Psi_{z_k}. \quad (6)$$

Влияние различных факторов на коэффициенты обмена учитываются с помощью теории относительного соответствия пограничного слоя. Предполагая, что результаты воздействий взаимно не связаны, относительный коэффициент теплоотдачи представляет собой произведение показателей – относительных значений, определяющих влияние отдельных воздействий

Показатели, входящие в (6), находятся по выражениям (4) и (5) численным методом, как, например, для относительного коэффициента влияния гидродинамической нестационарности трения, соответственно, коэффициента тепловой нестационарности теплообмена:

$$\Psi_z = \left( \frac{c_f}{c_{f0}} \right)_{Re^{**}=\text{const}}, \quad \Psi_{z_k} = \left( \frac{St}{St_0} \right)_{Re_k^{**}=\text{const}}. \quad (7)$$

Коэффициенты трения  $c_{f0}/2$  и теплообмена  $St_0$  рассчитываются для стационарных условий.

### Экспериментальная часть

Эксперименты выполнены на опытной установке, представляющей собой аэродинамическую трубу разомкнутого типа с плазменным подогревом рабочего тела [9]. Основными частями опытной установки являются плазмотрон, форкамера и опытный участок с системами электропитания, диагностики и газоснабжения. Нестационарные условия (наброс, постоянство и сброс тепловой нагрузки) реализуются при включении и выключении плазмотрона. Диагностическая аппаратура включает малоинерционные датчики температуры и давления, препарированные на наружной поверхности опытного участка с продольными координатами  $X = x/D = 0,5; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5; 5,5; 7,5; 9,5$  датчики температуры и давления газа типа ДМИ-0,1 П, а также измерительно-вычислительный комплекс (далее ИВК) на базе персонального компьютера и устройства ввода-вывода (далее УВВ) фирмы *National Instruments* с программным пакетом *LabView*. Дискретность отчета измеряемых параметров 10 мс. Опытный участок представляет собой тонкостенный (0,1 мм) цилиндрический канал диаметром 45 мм и длиной 10 калибров из нержавеющей стали, моделирующий проточные части энергетической установки. Пристенное трение определено методом «трубки-выступа». Эксперименты проведены при числах Рейнольдса  $15000 \div 55000$ , температуре теплоносителя  $300 \div 1500$  К, скорости понижения температуры газа до  $-4000$  К/с, стенки до  $-200$  К/с. Погрешность определения теплофизических параметров не превышает 7,5%, а гидродинамических параметров 6,5%.

### Методика обработки экспериментальных результатов

Для измерения касательных напряжений на опытном участке в сечениях с продольными координатами  $X = 2,5; 5,5; 9,5$  установлены модули измерения трения. Трение в опытном канале измеряется методом «трубки-выступа» [9]. Сущность измерения трения заключается в определении разности статических давлений на стенке и на некотором расстоянии от нее. Касательные напряжения рассчитываются по эмпирической формуле [9]. Тепловые потоки вычисляются по методу тонкой стенки ввиду малости критерия  $Bi \ll 1$  (Числа Био), согласно энергетическому балансу элементарной площадки стенки. Параметры пограничного слоя и «стандартные» значения коэффициента трения и числа Стантона  $St_0$  вычисляются согласно [7; 8] для стационарного изотермического обтекания гладкой пластины по формуле Шиллера Л.

### Обсуждение результатов

Тепловая переменность параметров, например, плотности, при постоянном массовом расходе вызывает возникновение гидродинамической нестационарности. Таким образом, в

рассматриваемых условиях одновременно действуют факторы и тепловой неравномерности (неизотермичность), и гидродинамической и тепловой нестационарности. Отметим, что в рамках принятой математической модели тепловая нестационарность не влияет на трение, в то же время гидродинамическая нестационарность, деформируя профиль энтальпий, приводит к незначительному (в пределах 3–5%) изменению коэффициента теплоотдачи.

Численный анализ показывает (рис. 2), что сброс температуры по потоку газа приводит к менее заполненному профилю осредненной скорости, затуханию вихревых явлений [10], и соответственно, к уменьшению коэффициента трения относительно стационарного значения (рис. 3). Деформация профиля скорости объясняется перестройкой во времени структуры пограничного слоя в нестационарных условиях. Каждому моменту времени должны соответствовать свои профили касательных напряжений, скорости и т.д.

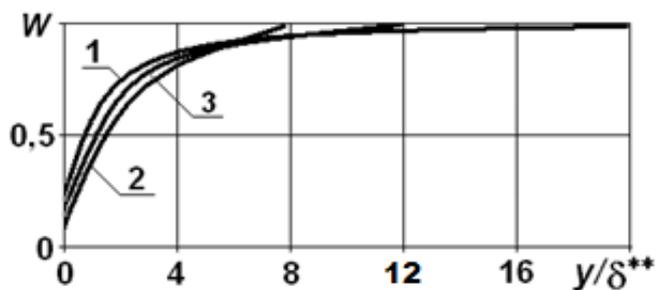


Рис. 2. Деформация профиля скорости под воздействием гидродинамической нестационарности для изотермических потоков:  
 $Re_{01}=44000$ ;  $Re^{**}=300$ ; 1 –  $Z=-10$ ; 2 –  $Z=0$ ; 3 –  $Z=10$

На рис. 3 показано влияние гидродинамической нестационарности на относительный коэффициент трения для различных чисел Рейнольдса. В рассматриваемых условиях параметр гидродинамической нестационарности невелик и  $z < 1,1$ , теоретически его влияние не превышает 9% в сторону понижения коэффициента трения.

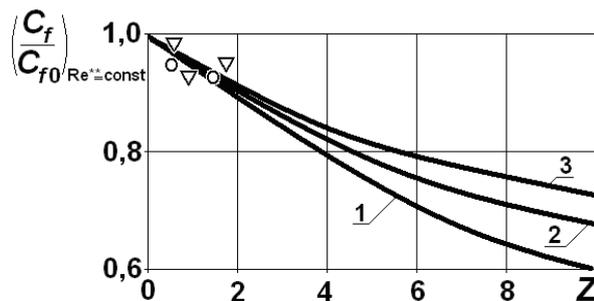


Рис. 3. Влияние гидродинамической нестационарности на относительный коэффициент трения для различных чисел Рейнольдса (линии – расчет по (7), точки – эксперимент):  
 1 –  $Re^{**}=250$ ; 2 –  $Re^{**}=500$ ; 3 –  $Re^{**}=2000$

Изменение коэффициента теплообмена в функции характерного теплового числа Рейнольдса показано на рис. 4. Интенсивность теплоотдачи в первоначальные моменты ниже стационарных значений, опытные точки с течением времени снизу стремятся к

«стандартной» (стационарной) зависимости. Ввод в закон теплоотдачи функций,  $\Psi_h \Psi_{z_k}$  позволяет обобщение результатов в виде  $\Psi_{z_k} = \left(\frac{St}{St_0}\right)_{Re_k^{**}=\text{const}} = f(Re_h^{**})$ , которое показано на рис. 5.

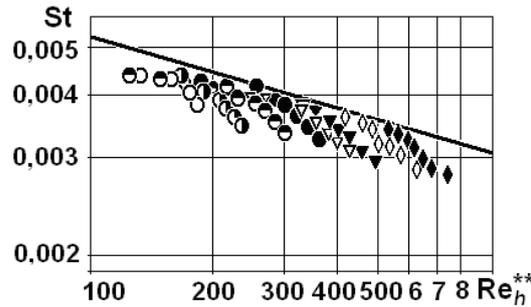


Рис. 4. Теплообмен при сбросе тепловой нагрузки.

Линия – расчет  $St_0 = \frac{0,0128}{Pr^{0,75} Re_h^{**0,25}}$ ; точки – эксперимент для продольных координат:

○ -  $X = 0,5$ ; ◐ -  $X = 1,5$ ; ◑ -  $X = 2,5$ ; ● -  $X = 3,5$ ;  
 ▽ -  $X = 4,5$ ; ▾ -  $X = 5,5$ ; ◊ -  $X = 7,5$ ; ◆ -  $X = 9,5$

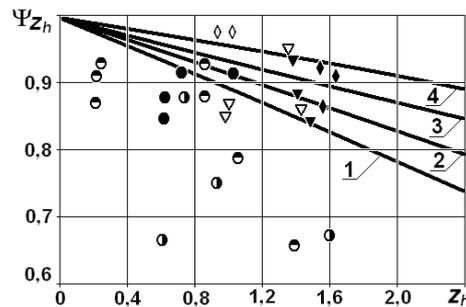


Рис. 5. Влияние тепловой нестационарности на относительный коэффициент теплообмена для различных тепловых чисел Рейнольдса (линии – расчет по (7), точки – эксперимент):

1 -  $Re_h^{**} = 150$ ; 2 -  $Re_h^{**} = 200$ ; 3 -  $Re_h^{**} = 700$ ; 4 -  $Re_h^{**} = 1000$

### Закключение

Таким образом, законы трения и теплообмена при сбросе тепловой нагрузки в условиях эксперимента и числа Рейнольдса  $15000 < Re_{01} < 55000$  можно представить в виде:

$$\frac{\bar{N}_f}{2} = \frac{0,0128}{Re^{**0,25}} \Psi_k \Psi_z;$$

$$St = \frac{0,0128}{Pr^{0,75} Re^{**0,25}} \Psi_h \Psi_{z_k}.$$

**Обозначения:**  $X = x/2r_0$  – безразмерная продольная координата;  $r_0$  – радиус канала, м;  $H$  – формпараметр;  $\mu$  – вязкость, Па·с;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $w_0$  – скорость основного потока;  $W = w/w_0$  – относительная скорость;  $Re_{01}$  – число Рейнольдса по параметрам входа канала;  $Re^{**}$  – характерное число Рейнольдса по толщине потери импульса;  $Re_h^{**}$  – характерное число Рейнольдса по толщине потери энергии;  $P$  – давление, Н/м<sup>2</sup>;  $h$  – энтальпия, Дж/кг;  $t$  – время, с;  $C_f/2 = \tau_w/\rho_0 w_0^2$  – безразмерный коэффициент трения;  $\tau_w$  – пристенное касательное напряжение, Н/м<sup>2</sup>;  $St = q_w/[\rho_0 w_0 (h_0^* - h_w)]$  – число Стантона;  $Pr$  – число Прандтля;  $\delta$  –

толщина пограничного слоя;  $\Phi_h = h_w/h_0$  – энтальпийный фактор;  $q_w$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\Psi_h$  – функция учета температурной неравномерности;  $\Psi_z$  – функция учета гидродинамической нестационарности;  $\Psi_{z_k}$  – функция учета тепловой нестационарности в законе теплоотдачи (относительный коэффициент теплоотдачи); индексы:  $_0$  – параметры основного (внешнего по отношению пограничного слоя) потока;  $_w$  – параметры на стенке;  $_h$  – тепловой параметр; \* – параметр торможения;  $_{01}$  – параметры на входе в канал.

### Литература

1. Yu Rao, Feng Bo Li, Bernhard Weigand. Experimental and Numerical Study of Heat Transfer and Flow Friction in Channels With Dimples of Different Shapes. *J. Heat Transfer*. 2015. Vol. 137. Pp. 031901–10.
2. Isaev S.A., Schelchkov A.V., Leontiev A.I., Gortyshov Yu.F., Baranov P.A., Popov I.A. Vortex heat transfer enhancement in the narrow plane-parallel channel with the oval-trench dimple of fixed depth and spot area. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 95. Pp. 40–62.
3. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. М.: Машиностроение, 1982. 240 с.
4. Ranaware A.G. Bhosale S.Y. A Study of Heat Transfer Enhancement using V Shaped Dimples on a Flat Plate with Experimentation & CFD. *Global Research and Development Journal for Engineering*. 2016. Vol. 1. Pp. 104–110.
5. Попов И.А., Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В. Промышленное применение интенсификации теплообмена – современное состояние проблемы (обзор) // Теплоэнергетика. 2012. № 1. С. 3–17.
6. Popov I.A., Shchelchkov A.V., Zubkov N.N., Lei R.A., Gortyshov Y.F. Boiling heat transfer of different liquids on microstructured surfaces. *Russian Aeronautics*. 2014. Vol. 57. No. 4. Pp. 395–401.
7. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергия, 1972, 344 с.
8. Фафурин А.В. Законы трения и теплоотдачи в турбулентном пограничном слое // Тепло-массообмен в двигателях летательных аппаратов. Казань, 1979. С. 62–69. (Сб. науч. тр./КАИ).
9. Гильфанов К.Х., Подымов В.Н., Минвалеев Н.Ю., Сибгатуллин И.Ф., Гайнуллин Р.Н. Амплитудно-фазовые частотные характеристики гидродинамических и тепловых параметров в коротком цилиндрическом канале // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 11–12. С. 81–88.
10. Молочников В.М., Мазо А.Б., Малюков А.В., Калинин Е.И., Михеев Н.И., Душина О.А., Паерелий А.А. Особенности формирования вихревых структур в отрывном течении за выступом в канале при переходе к турбулентности // Теплофизика и аэромеханика. 2014. № 3. С. 325–334.

### Авторы публикации

**Гильфанов Камиль Хабибович** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств» (АТПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Якимов Николай Дмитриевич** – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Минвалеев Наиль Юнусович** – аспирант Казанского государственного энергетического университета.

**Шешуков Евгений Геннадьевич** – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Энергетическое машиностроение» (ЭМ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Богданова Наталия Владимировна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств» (АТПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

### References

1. Yu Rao, Feng Bo Li, Bernhard Weigand. Experimental and Numerical Study of Heat Transfer and Flow Friction in Channels With Dimples of Different Shapes. *J. Heat Transfer*. 2015. Vol. 137. Pp. 031901–10.
2. Isaev S.A., Schelchkov A.V., Leontiev A.I., Gortyshov Yu.F., Baranov P.A., Popov I.A. Vortex heat transfer enhancement in the narrow plane-parallel channel with the oval-trench dimple of fixed depth and spot area. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 95. Pp. 40–62.
3. Popov D.N. Nestatsionarnye gidromekhanicheskie protsessy. M.: Mashinostroenie, 1982. 240 p.
4. Ranaware A.G. Bhosale S.Y. A Study of Heat Transfer Enhancement using V Shaped Dimples on a Flat Plate with Experimentation & CFD. *Global Research and Development Journal for Engineering*. 2016. Vol. 1. Pp. 104–110.
5. Popov I.A., Gortyshov Yu.F., Olimpiyev V.V. Promyshlennoe primeneniye intensivatsii teploobmena – sovremennoe sostoyaniye problemy (obzor) // *Teploenergetika*. 2012. No. 1. P. 3–17.
6. Popov I.A., Shchelchkov A.V., Zubkov N.N., Lei R.A., Gortyshov Y.F. Boiling heat transfer of different liquids on microstructured surfaces. *Russian Aeronautics*. 2014. Vol. 57. No. 4. Pp. 395–401.
7. Kutateladze S.S., Leont'ev A.I. *Tplomassoobmen i treniye v turbulentnom pogranichnom sloe*. M.: Energiya, 1972, 344 p.
8. Fafurin A.V. Zakony treniya i teplootdachi v turbulentnom pogranichnom sloe // *Tplomassoobmen v dvigatelyakh letatel'nykh apparatov*. Kazan', 1979. P. 62–69. (Sb. nauch. tr./KAI).
9. Gil'fanov K.KH., Podymov V.N., Minvaleev N.YU., Sibgatullin I.F., Gaynullin R.N. Amplitudno-fazovyye chastotnyye kharakteristiki gidrodinamicheskikh i teplovykh parametrov v korotkom tsilindricheskom kanale // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2014. No. 11–12. P. 81–88.
10. Molochnikov V.M., Mazo A.B., Malyukov A.V., Kalinin E.I., Mikheev N.I., Dushina O.A., Paereliy A.A. Osobennosti formirovaniya vikhrevykh struktur v otryvnom techenii za vystupom v kanale pri perekhode k turbulentnosti // *Teplofizika i aeromekhanika*. 2014. No. 3. P. 325–334.

### Authors of the publication

**Kamil H. Gilfanov** – Doctor of Technical Sciences, professor, Department “Automation of technological processes and productions”, Kazan state Power engineering university.

**Nikolay D. Yakimov** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, Department “Theoretical basis of heat engineering”, Kazan state Power engineering university.

**Nail Y. Minvaleev** – graduate student, Kazan state Power engineering university.

**Evgeniy G. Sheshukov** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, Department “Power machine building”, Kazan state Power engineering university.

**Nataliya W. Bogdanova** – cand. sci. (techn.), assistant professor Department “Automation of technological processes and productions”, Kazan state Power engineering university.

*Поступила в редакцию*

*13 марта 2018 г.*

**АНАЛИЗ КОМПОНОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ ЭЛЕКТРОЛИЗНОГО ЦЕХА  
ВОДОРОДНОЙ НАДСТРОЙКИ С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ  
И ВЗРЫВОПОЖАРООПАСНОСТИ**

**Р.З. Аминов<sup>1</sup>, А.В. Портянкин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Саратовский научный центр Российской академии наук, г. Саратов, Россия

<sup>2</sup>Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,  
г. Саратов, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1549-5133>, oepран@inbox.ru

**Резюме:** В статье рассмотрены компоновочные решения электролизного цеха водородной надстройки за территорией АЭС. Для этого произведена оценка годового риска с учетом надежности и взрывопожароопасности для 1–4, 8 и 16 отдельных электролизных цехов, установленных на площадке водородной надстройки. При учете поломок оборудования, с возможными взрывами и пожарами в электролизных цехах, риск по причине пожаров и взрывов оказался в разы ниже риска, связанного с отказами оборудования. Расчеты показали, что перевод электролизных установок на повышенную производительность по водороду в случае отказа одного из электролизеров оказывается наилучшим вариантом по сравнению со снижением выработки электроэнергии на паротурбинной установке водородной надстройки.

**Ключевые слова:** атомная электростанция, водородная надстройка, взрыв, пожар, ущерб, риск, надежность.

**Благодарности:** Статья подготовлена при поддержке РФФ, грант № 15-19-10027.

**DOI:**10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-29-36

**ANALYSIS OF LAYOUT SOLUTIONS OF ELECTROLYSIS SHOP  
OF HYDROGEN SUPERSTRUCTURE TAKING INTO ACCOUNT THE RELIABILITY  
AND EXPLOSION RISK**

**R.Z. Aminov<sup>1</sup>, A.V. Portyankin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Saratov scientific center of the Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia

<sup>2</sup> Saratov state technical university of a name of Gagarin Yu.A., Saratov, Russia  
oepран@inbox.ru

**Abstract:** The article considers the layout solutions of the electrolysis shop of the hydrogen superstructure outside the territory of the nuclear power plant. To do this, an annual risk assessment was carried out taking into account the reliability and explosion risk for 1-4, 8 and 16 separate electrolysis shops installed on the site of the hydrogen superstructure. When taking into account equipment breakdowns, with possible explosions and fires in electrolysis plants, the risk due to fires and explosions was several times lower than the risk associated with equipment failures. Calculations showed that the transfer of electrolysis plants to increased hydrogen productivity in the event of failure of one of the cells is the best option in comparison with the reduction in the generation of electricity at the steam turbine installation of the hydrogen superstructure.

**Keywords:** nuclear power plant, hydrogen superstructure, explosion, fire, damage, risk, reliability.

**Acknowledgments:** The article was prepared with the support of the Russian Science Foundation, grant № 15-19-10027.

### Введение

Получение электролизного водорода за счет дешевой ночной электроэнергии атомной электрической станцией (АЭС) позволяет, с одной стороны, обеспечить их базисной нагрузкой и, в то же время, сжигая водород в кислородной среде, получать пар, используемый для генерации пиковой электроэнергии в часы максимума электропотребления [1].

Так как АЭС является особо опасным объектом, а водородная надстройка опасным объектом, то согласно Правилам безопасности [2] при емкостях хранения более 1000 м<sup>3</sup> площадку водородной надстройки следует располагать на расстоянии не менее 100 м от территории АЭС (как для жилых и общественных зданий). Внутри площадки водородной надстройки емкости хранения водорода должны располагаться на расстоянии к цехам водородной надстройки не менее 30 метров и таком же расстоянии между ними. Для этого стены зданий цехов водородной надстройки выполняются в противопожарном исполнении и оборудуются стационарными автоматическими системами пожаротушения, т.е. 1 и 2 степенью огнестойкости. На рис. 1 показан план размещения площадки водородной надстройки за территорией АЭС.

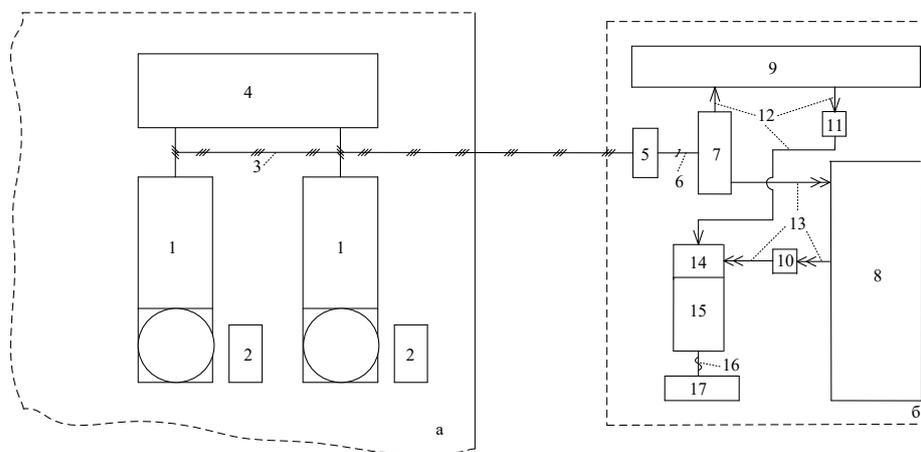


Рис. 1. Расположение водородной надстройки за территорией АЭС:

*a* – площадка АЭС; *б* – площадка водородной надстройки;

*1* – энергоблок АЭС; *2* – резервная дизель-электрическая станция; *3* и – линии электропередач генераторного напряжения АЭС и водородной надстройки; *4* и *17* – открытые распределительные устройства АЭС и водородной надстройки; *5* – подстанция преобразования тока; *6* – линии электропередач постоянного тока; *7* – электролизный цех; *8*, *9* – площадка емкостей хранения водорода и кислорода; *10*, *11* – компрессорный цех водорода и кислорода; *12*, *13* – трубопроводы водорода и кислорода; *14* – цех камеры сгорания; *15* – турбинный цех; *16* – автоматический выключатель(переключатель) для подачи нагрузки на АЭС

Удаленное расположение водородной надстройки обеспечивает необходимую безопасность воздействия на АЭС, но остаётся проблема с обеспечением надежности и взрывопожароопасности при производстве водорода методом электролиза воды, его

компримировании, хранении, транспортировке и использовании на самой водородной надстройке.

### **Теоретические основы и результаты расчетов**

Для уменьшения вероятности утечек водорода из емкостей хранения в атмосферу предпочтительно их размещать в подземном исполнении. Аналогичным образом следует прокладывать водородопроводную сеть, соединяющую емкости хранения с цехами компримирования, получения и использования водорода. Хотя подземное размещение оборудования и увеличивает капиталовложения в их сооружение, но при постоянном контроле и своевременном техническом освидетельствовании (проведении гидравлических испытаний и осмотров) это позволит снизить вероятность события, связанного с разгерметизацией данного оборудования. В итоге подземное исполнение позволяет минимизировать истечение водорода в больших количествах через землю и дальнейшее его соединение с кислородом, который содержится в воздухе, если ситуация с утечкой все-таки произошла.

Ситуации с утечкой водорода в цехах получения, компримирования и использования исключать нельзя, и причиной этому может служить следующее:

- неплотности в электролизере и их возрастание при увеличении числа электролизеров;
- снижение уровня масла в системе уплотнения и через фланцевое соединение каплеотделителя в компрессоре;
- малоцикловая и обычная усталость; температурные перенапряжения вследствие пусков и остановок; высокая рабочая температура камер сгорания (выше, чем температура самовоспламенения водорода) и т.д.

Рассмотрим все возможные случаи отказов оборудования на примере электролизного цеха. В данном цеху наработка на отказ (выход из строя, т.е. поломка) оборудования, оценивается в 11500 часов. Другая ситуация связана с разгерметизацией оборудования под давлением с утечкой взрывоопасного вещества, и она по Руководству [3] оценивается в среднем  $1,24 \cdot 10^{-5}$  событий на оборудование за один год эксплуатации или  $\text{год}^{-1}$ , если данное оборудование работает 8760 часов в году. Разгерметизация – это такая же поломка оборудования, но с наложением других сопутствующих факторов она может привести к взрывопожарной ситуации.

Так как суточное время работы электролизного оборудования принято равным семи часам и с учетом 65 суток в году плановых и капитальных ремонтов оборудования (турбины, компрессора и пр.) водородной надстройки, полное время работы составит 2100 ч/год. Тогда интенсивность отказов будет равна  $\lambda_{\text{отк.}}=0,18 \text{ год}^{-1}$ , а интенсивность разгерметизации  $\lambda_{\text{раз.}}=2,94 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$ . По [1; 4; 5] примем интенсивности пожаров и взрывов водородовоздушных смесей в электролизном цеху, которые будут равны, соответственно,  $\lambda_{\text{вз.}}=2,65 \cdot 10^{-9} \text{ год}^{-1}$  и  $\lambda_{\text{пож.}}=2,59 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$ .

Время ремонта оборудования ( $t_{\text{рем.}}$ ) принято 60 часов как при отказах, так и при разгерметизации. В случае наложения события взрыва в электролизном цехе время восстановления принято 1 год, а при пожаре – в десять раз меньше.

Для оценки возможных ущербов оборудованию в электролизном цехе и дополнительных расходов денежных средств необходимо оценить расход получаемого водорода, определяющего мощность паротурбинной установки (ПТУ) водородной надстройки, и суточную производительность её работы. Исходные данные для расчета представлены в табл. 1. В результате расчета расход водорода на ПТУ составил 1,12 кг/с. Тогда, с учетом времени работы ПТУ 7 часов и пусковых режимов, суточная масса запасенного водорода в емкостях хранения оценивается около 31 тонны или  $3,4 \cdot 10^5 \text{ нм}^3/\text{ч}$ . Мощность электролизного цеха составила 197 МВт, при удельном расходе электроэнергии на электролиз 4 кВт·ч/нм<sup>3</sup> и плотности водорода 0,09 кг/нм<sup>3</sup>.

Исходные данные для расчета ПТУ	
Параметр	Значение
Вырабатываемая мощность ПТУ, МВт	50
Давление пара перед турбиной, МПа	12,75
Температура пара перед турбиной, °С	550
Давление в конденсаторе, МПа	0,004
Температура воды перед камерой сгорания, °С	33

В работе рассмотрены следующие варианты компоновочных решений электролизного цеха водородной надстройки:

Вариант 1 – компоновка одного электролизера, работающего под давлением, мощностью 197 МВт;

Вариант 2–5 – компоновка 2, 4, 8 и 16 электролизеров в отдельных цехах –  $n_{\text{цех}}$ , обеспечивающих мощность 197 МВт.

В случае поломки электролизного оборудования в варианте 1 произойдет простой оборудования на время ремонта – это приведет к недовыработке электроэнергии ПТУ водородной надстройки.

Сооружение отдельных цехов приведет к росту капитальных вложений. Самые низкие удельные капиталовложения  $K_{\text{уд}}$  достигаются при расположении электролизеров в одном цеху. При возможном сценарии взрыва, связанного с утечкой водорода в одном из электролизеров и дальнейшего обрушения кровли, все это приведет к выходу из строя других электролизеров. Такую компоновку следует рассматривать, если в одном цеху располагается от 2 до 5 электролизеров мощностью 2 МВт, каждый. Для принятого уровня мощности необходимо устанавливать 100 электролизных установок в 20–50 цехах, что заведомо неэффективно.

Для варианта 2 при отказе и разгерметизации одного электролизера оценим вероятность безотказной работы оставшейся в эксплуатации электролизной установки. С учетом времени ее работы в сутки часов и ремонтных работ, период эксплуатации за это время составит:

$$t_{\text{экс.}} = \frac{t_{\text{раб.}} \cdot t_{\text{рем.}}}{t_{\text{сут.}}},$$

где  $t_{\text{раб.}}$  – время работы в сутки электролизного оборудования и ПТУ одинаковы и равны 7 часам;  $t_{\text{сут.}}$  – число часов в сутках.

Тогда вероятность безотказной работы можно оценить:

$$P_t = e^{-(\lambda_{\text{отк.}} + \lambda_{\text{раз.}}) \cdot t_{\text{экс.}}},$$

где  $\lambda = 1/\text{ч}^{-1}$ . Таким образом, вероятность безотказной работы системы составит  $P_{17,5} = 0,9985$ .

Вероятность отказа оценивается как

$$P_{t(\text{отк.})} = 1 - P_t = 1 - 0,9985 = 1,5 \cdot 10^{-3}.$$

Вероятность взрыва и пожара во втором цехе в этот период составит  $p_{17,5(\text{вз.})} = 4,7 \cdot 10^{-8}$  и  $p_{17,5(\text{пож.})} = 4,53 \cdot 10^{-7}$ .

При взрывах и пожарах в одном из электролизных цехов (если такая ситуация все-таки произошла) и с учетом времени работы в ночные часы графика электрической нагрузки электролизного оборудования во втором цехе, электролизер должен проработать 2100 часов и 210 часов в году в период восстановительных работ соответственно. Тогда вероятность отказов, пожаров и взрывов составит:

– при сценарии пожара в одном из цехов  $p_{210(\text{отк.})} = 1,8 \cdot 10^{-2}$ ,  $p_{210(\text{вз.})} = 5,56 \cdot 10^{-7}$  и  $p_{210(\text{пож.})} = 5,43 \cdot 10^{-6}$  проводятся только восстановительные работы;

– при сценарии взрыва в одном из цехов (строительство нового цеха)  $p_{2100(отк.)}=0,1668$ ,  $p_{2100(вз.)}=5,57 \cdot 10^{-6}$  и  $p_{2100(пож.)}=4,43 \cdot 10^{-5}$ .

Срок службы электролизной установки оценивается в 10 лет непрерывной ее эксплуатации, т.е. 87600 часов, тогда рассчитаем вероятность взрыва и пожара в электролизном цехе  $p_{87600(вз.)}=2,32 \cdot 10^{-4}$  и  $p_{87600(пож.)}=2,26 \cdot 10^{-3}$ .

Из анализа вышесказанного можно сделать вывод, что для вариантов 3–5 при отказе электролизного оборудования в одном из цехов вероятность отказов всех электролизеров в других цехах в период ремонтных работ возможна, но маловероятна. Примером этому может служить резервирование собственных нужд АЭС в случае ее обесточивания с тремя дизель-генераторными установками [6–9].

С увеличением количества электролизных установок интенсивность отказов возрастает пропорционально их количеству, следовательно возрастет и вероятность отказа электролизного оборудования в каком-либо из цехов водородной надстройки за один год эксплуатации. Поэтому при сопоставлении вариантов 1–5 зададимся выходом из строя одного электролизера в одном из цехов по различным причинам (отказ, разгерметизация, взрыв и пожар).

Возможные ущербы оборудованию ( $Y$ ) и понесенные риски ( $R$ ) в электролизном цехе представлены в табл. 2.

Таблица 2

Возможные ущербы оборудованию и понесенные риски в электролизном цехе						
Параметр	Размерность	Варианты				
		1	2	3	4	5
$n_{цех.}$	шт	1	2	4	8	16
$K_{уд.}$	млн руб/МВт	20,0	22,0	24,2	26,6	29,3
$K_{эл.ц.}$	млрд руб	3,9	4,3	4,8	5,2	5,8
$Y_{нед.}$ :						
– поломка ( $Y_{нед.1}$ )	млн руб	2,7	1,35	0,68	0,34	0,17
– взрыв ( $Y_{нед.2}$ )	млн руб	326	163	81,5	40,75	20,4
– пожар ( $Y_{нед.3}$ )	млн руб	32,6	16,3	8,15	4,08	2,04
$R_{вз.}$	руб/год	10,4	11,4	12,6	13,9	15,2
$R_{пож.}$	руб/год	1,0	1,1	1,2	1,4	1,5
$R_{нед.}$ :						
– поломка ( $R_{нед.1}$ )	руб/год	496224				
– взрыв ( $R_{нед.2}$ )	руб/год	0,86				
– пожар ( $R_{нед.3}$ )	руб/год	0,84				
$\sum R_{год}$	руб/год	496237	496238	496340	496341	496342

Все ущербы оборудованию при взрывах равны капиталовложениям в один электролизный цех. Годовые затраты на ремонт оборудования, в том числе на плановые и капитальные ремонты, заложены в постоянные затраты на обслуживание и прочее, и они равны 3% от капиталовложений в электролизные цеха –  $K_{эл.ц.}$ . Риск от недовыработки электроэнергии при восстановлении оборудования по причине поломки рассчитывался следующим образом:

$$R_{нед.1} = Y_{нед.1} \times (\lambda_{отк.} + \lambda_{раз.}),$$

где  $Y_{нед.1}$  – ущерб от недовыработки электроэнергии (при тарифе  $-T_{э} = 3,5$  руб/(кВт·ч)) по причине поломки оборудования, руб. Так как выше было сказано: разгерметизация – это такая же поломка оборудования, если в дальнейшем она не приводит к взрывопожароопасной ситуации. Все остальные риски оценены по методике, рассмотренной в работах [1; 4; 5].

Из анализа табл. 2 видно, что ущерб от недовыработки электроэнергии ПТУ снижается пропорционально количеству электролизных цехов, но при этом риск от

недовыработки остается неизменным, т.к. пропорционально возрастает интенсивность отказов электролизного оборудования. Риски от пожаров и взрывов растут пропорционально росту капиталовложений в электролизные цеха. С ростом количества электролизных цехов наблюдается незначительная динамика увеличения суммарного годового риска –  $\sum R_{\text{год}}$ .

Для второго варианта характерны следующие особенности: при поломках или возможных взрывах и пожарах в одном из цехов, второй останется в работе. Согласно [10] производительность электролизера можно увеличить на 40 %, но это приведет к росту удельного расхода энергии на выработку водорода по сравнению с номинальным режимом. При увеличении плотности тока возрастают перенапряжения на аноде и катоде, омические потери, утечки тока и другие потери энергии, что приводит к перерасходу электроэнергии на единицу продукции. Увеличение производительности одного из электролизеров обеспечит 70% вырабатываемой мощности ПТУ от номинальной, но при этом на 10% увеличится удельный расход энергии на производство водорода.

В вариантах 3–5 при выходе из строя одного электролизера удельный расход электроэнергии на производство водорода оценивается 4,32–4,08 кВт·ч/нм<sup>3</sup>, соответственно. Оставшиеся в работе электролизные установки смогут обеспечить 100 % нагрузку ПТУ водородной надстройки.

Оценим возможные риски за счет форсирования производительности оставшихся в работе электролизных установок. Результаты расчетов при различной себестоимости электроэнергии –  $S_{\text{ээ}}$  от АЭС 2 и 0,7 руб/(кВт·ч) представлены в табл. 3.

Таблица 3

Возможные риски при форсировании производительности электролизных установок						
Параметр	Размерность	Варианты				
		1	2	3	4	5
$R_{\text{нед.}}$ :						
– поломка ( $R_{\text{нед.1}}$ )	руб/год	496224	148867	0	0	0
– взрыв ( $R_{\text{нед.2}}$ )	руб/год	0,86	0,26	0	0	0
– пожар ( $R_{\text{нед.3}}$ )	руб/год	0,84	0,25	0	0	0
$S_{\text{ээ}}$	руб/(кВт·ч)	0,7(2)				
$R_{\text{пер.}}$ :						
– поломка ( $R_{\text{пер.1}}$ )	руб/год	0	61541(175831)	140664(401898)		
– взрыв ( $R_{\text{пер.2}}$ )	руб/год	0	0,11(0,31)	0,25(0,7)		
– пожар ( $R_{\text{пер.3}}$ )	руб/год	0	0,1(0,3)	0,24(0,69)		

Из анализа табл. 3 видно, что для вариантов 3–5 риски от перерасхода электроэнергии  $R_{\text{пер.}}$  одинаковы, т.к. электролизеры обеспечивают 100% нагрузку ПТУ, а вариант 2 обеспечивает 70% по производительности водорода. Все риски от пожаров и взрывов для табл. 3 равны результатам, представленным в табл. 2.

Суммарные годовые риски по результатам в табл. 2 и 3 показаны на рис. 2, но с добавлением варианта с тремя электролизными цехами и дополнительным диапазоном себестоимости электроэнергии.

Как видно из рис. 2, сценарии 2–5 показывают наименьшие суммарные годовые риски, но с учетом незначительного роста риска от взрывов и пожаров выигрывает компоновка с четырьмя электролизными цехами по отношению к 8 и 16 цехам. Следовательно, разница цены электроэнергии в ночные и пиковые часы графика электрической нагрузки оказывает наибольшее влияние на годовые риски с учетом отказов оборудования, т.е. целесообразно производить форсирование производительности электролизных установок по сравнению с разгрузкой ПТУ водородной надстройки.

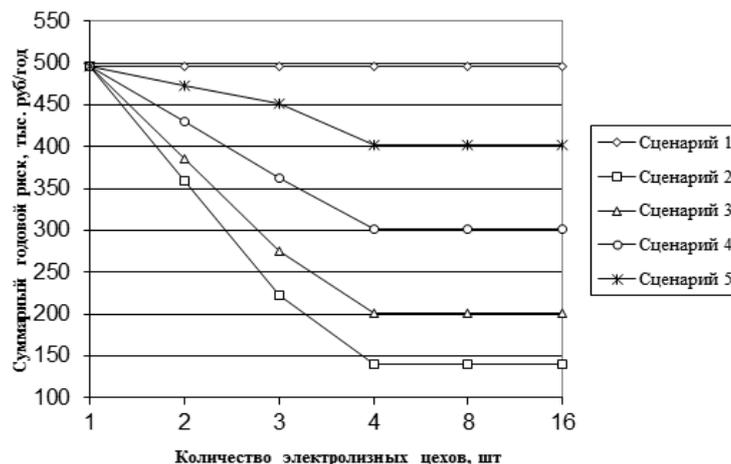


Рис. 2. Суммарный годовой риск по результатам табл. 2 и 3: сценарий 1 – без форсирования производительности электролизных установок; сценарий (2 – 5) – с форсированием производительности электролизных установок (при себестоимости электроэнергии: 0,7; 1; 1,5; и 2 руб/(кВт·ч), соответственно)

### Вывод

При учете поломок оборудования, с возможными взрывами и пожарами в электролизных цехах, риск по причине пожаров и взрывов оказался в разы ниже риска, связанного с отказами оборудования. Расчеты показали, что наименьший годовой риск приходится на водородную надстройку с четырьмя электролизными цехами при себестоимости ночной электроэнергии 0,7–2 руб/(кВт·ч), поэтому перевод электролизных установок на повышенную производительность по водороду в случае отказа одного из электролизера оказывается наилучшим вариантом по сравнению со снижением выработки электроэнергии на ПТУ водородной надстройки.

### Литература

1. Аминов Р.З., Байрамов А.Н. Комбинирование водородных энергетических циклов с атомными электростанциями. Саратовский научный центр РАН. М.: Наука, 2016. 254 с.
2. Правила безопасности при производстве водорода методом электролиза воды: ПБ 03-598-03: утв. Ростехнадзором России 06.06.03 [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: <http://himenergo.ru/usr/file/PB%2003-598-03.pdf> (дата обращения: 25.08.2017).
3. Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий // Москва 2006 [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: [http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/541573/rukovodstvo\\_po\\_otsenke\\_pozharnogo\\_riska\\_dlya\\_promyshlennykh\\_predpriyatii.pdf](http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/541573/rukovodstvo_po_otsenke_pozharnogo_riska_dlya_promyshlennykh_predpriyatii.pdf) ((дата обращения: 25.08.2017).
4. Аминов Р.З., Хрусталева В.А., Портянкин А.В. Взрывопожароопасность на АЭС с водородными надстройками. Анализ проблемы и пути решения // Труды Академэнерго. 2013. № 3. С. 41–51.
5. Aminov R.Z., Khrustalev V.A., Portyankin A.V. The effectiveness of power generating complexes constructed on the basis of nuclear power plants combined with additional sources of energy determined taking risk factors into account // Thermal Engineering. 2015. Vol. 62. No. 2. P. 130–137.
6. Аминов Р.З., Юрин В.Е., Муртазов М.А. К учету переходных состояний системы при проведении вероятностного расчета резервирования собственных нужд АЭС // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 5–6. С. 3–11.
7. Аминов Р.З., Юрин В.Е. Вероятностная оценка безопасности АЭС в состояниях обесточивания при резервировании собственных нужд на основе водородного цикла // Труды Академэнерго. 2013. № 2. С. 31–39.

8. Station blackout. Regulatory Guide 1.155. Nuclear Regulatory Commission. USA. 1988.
9. Sabah J., Zaharija-Tiska D., Strbuncelj Z. Large diesel generators for nuclear power stations and processing industry. *Koncar journal*. 1988. No. 1. P. 41–47.
10. Шпильрайн Э.Э., Мальшенко С.П., Кулешов Г.Г. Введение в водородную энергетику / под редакцией Легасова В.А. М.: Энергоатомиздат, 1984. 264 с.

#### **Авторы публикации**

**Аминов Рашид Зарифович** – д-р техн. наук, профессор, руководитель Саратовского научного центра Российской академии наук (СНЦ РАН).

**Портянкин Алексей Владимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Тепловая и атомная энергетика» им. А.И. Андрющенко Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А. (СГТУ).

#### **References**

1. Aminov R.Z., Bayramov A.N. Kombinirovanie vodorodnykh energeticheskikh tsiklov s atomnymi elektrostantsiyami. Saratovskiy nauchnyy tsentr RAN. M.: Nauka, 2016. 254 p.
2. Pravila bezopasnosti pri proizvodstve vodoroda metodom elektroliza vody: PB 03-598-03: utv. Gostekhnadzorom Rossii 06.06.03 [Elektronnyy resurs]. Sistem. trebovaniya: Adobe Acrobat Reader. – URL: <http://himenergo.ru/usr/file/PB%2003-598-03.pdf> (data obrascheniya: 25.08.2017).
3. Rukovodstvo po otsenke pozharnogo riska dlya promyshlennykh predpriyatiy // Moskva 2006 [Elektronnyy resurs]. Sistem. trebovaniya: Adobe Acrobat Reader. – URL: [http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/541573/rukovodstvo\\_po\\_otcenke\\_pozharnogo\\_riska\\_dlya\\_promyshlennykh\\_predpriyatii.pdf](http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/541573/rukovodstvo_po_otcenke_pozharnogo_riska_dlya_promyshlennykh_predpriyatii.pdf) ((data obrascheniya: 25.08.2017).
4. Aminov R.Z., Khrustalev V.A., Portyankin A.V. Vzryvopozharoopasnost' na AES s vodorodnymi nadstroykami. Analiz problemy i puti resheniya // Trudy Akademenergo. 2013. No. 3. P. 41–51.
5. Aminov R.Z., Khrustalev V.A., Portyankin A.V. The effectiveness of power generating complexes constructed on the basic of nuclear power plants combined with additional sources of energy determined taking risk factors into account // Thermal Engineering. 2015. Vol. 62. No. 2. P. 130–137.
6. Aminov R.Z., Yurin V.E., Murtazov M.A. K uchetu perekhodnykh sostoyaniy sistemy pri provedenii veroyatnostnogo rascheta rezervirovaniya sobstvennykh nuzhd AES // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. 2016. No. 5–6. P. 3–11.
7. Aminov R.Z., YUrin V.E. Veroyatnostnaya otsenka bezopasnosti AES v sostoyaniyakh obestochivaniya pri rezervirovanii sobstvennykh nuzhd na osnove vodorodnogo tsikla // Trudy Akademenergo, 2013. No. 2. P. 31–39.
8. Station blackout. Regulatory Guide 1.155. Nuclear Regulatory Commission. USA. 1988.
9. Sabah J., Zaharija-Tiska D., Strbuncelj Z. Large diesel generators for nuclear power stations and processing industry. *Koncar journal*. 1988. No. 1. P. 41–47.
10. Shpil'rayn E.E., Malysenko S.P., Kuleshov G.G. Vvedenie v vodorodnyuyu energetiku / pod redaktsiyey Legasova V.A. M.: Energoatomizdat, 1984. 264 p.

#### **Authors of the publication**

**Rashid Z. Aminov** – dr. Sci. (techn.), professor, head of the Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.

**Aleksey V. Portyankin** – cand. sci. (techn.), associate professor of the A.I. Andryushchenko Department “Thermal and Nuclear Power” Gagarin Yu.A. Saratov State Technical University.

*Поступила в редакцию*

*24 ноября 2017 г.*

## ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПЛАСТИН АБСОРБЕРА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА

М.М. Асанов

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8268-8114>, [asanov.m.m@cfuv.ru](mailto:asanov.m.m@cfuv.ru)

**Резюме:** Повысить эффективность работы солнечных энергетических установок можно путем непрерывного поворота их поглощающей поверхности в направлении Солнца. Проанализированы существующие системы поворота (слежения) за Солнцем. Рассмотрена работа воздушного солнечного коллектора настенного типа. Пластины абсорбера коллектора были расположены двумя способами – горизонтально и вертикально. Работа системы слежения коллектора с горизонтально расположенными пластинами состоит в их повороте за Солнцем по углу между направлением на него и горизонтальной поверхностью. Положение вертикально установленных пластин зависит от азимута Солнца. Рассчитано взаимное затемнение пластин абсорберов двух типов при повороте в направлении Солнца. Для оценки эффективности коллектора была исследована его работа в течение двух дней в году – 1.01.2016 и 11.06.2016. Для сравнения характеристик коллектора с абсорберами разного типа была составлена его математическая модель.

**Ключевые слова:** солнечный воздушный коллектор, слежение за Солнцем, моделирование.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-37-45

## ABSORBER PLATES POSITION INFLUENCE ON SOLAR COLLECTOR OPERATION EFFICIENCY

М.М. Асанов

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8268-8114>, [asanov.m.m@cfuv.ru](mailto:asanov.m.m@cfuv.ru)

**Abstract:** In order to increase the operating efficiency of solar power generating system its absorbing surface must be continuously turned towards the Sun. Modern Sun tracking systems are analyzed. Operation of solar air wall-type collector is considered. Collector's absorber plates were situated in two ways – horizontally and vertically. Operation of the collector with horizontally situated plates is to turn of the plates towards the Sun according to solar altitude angle. Vertically situated plates position depends on solar azimuth angle. Cross shading of the absorbers plates during Sun tracking is calculated. To estimate the collector efficiency its operation within two days of the year (1.01.2016 and 11.06.2016) is studied. In order to compare the collectors' characteristics with different types of the absorber the mathematical model is built.

**Keywords:** solar air collector, Sun tracking, modeling.

### Введение

Задача повышения эффективности работы солнечных энергетических установок всегда остро стоит перед их разработчиками. Существует целый ряд разнообразных

методик, используемых для решения данного вопроса, который, в конечном счете, заключается в снижении стоимости каждого киловатта вырабатываемой энергоустановкой энергии. Принцип работы одного из таких методов заключается в последовательном повороте («слежении») поглощающей поверхности установки для того, чтобы солнечное излучение падало на него под прямым углом [1; 2].

Работу системы слежения за Солнцем можно организовать, используя астрономические данные его положения в каждый момент времени или по данным датчиков, определяющих угол падения солнечного излучения [3].

Обзор современных следящих систем показан в работах [4; 5].

Рост выработки электроэнергии фотоэлектрическими преобразователями с использованием следящих систем может достигать 44% по сравнению с неподвижно установленными панелями [4]. Приведены схемы и иллюстрации, описывающие принцип работы всевозможных систем слежения за Солнцем. Проанализированы параметры систем и их влияние на эффективность работы фотоэлектрических панелей.

Технические характеристики солнечных энергоустановок сведены в таблицы [5]. Используемые системы слежения основываются как на сигналах от датчика положения Солнца или оптико-электронного датчика, так и на астрономических данных. Точность слежения описанных установок составляет от 0,01 до 2 градусов. Автором [5] разработана автоматическая система управления поворота фотоэлектрических преобразователей за Солнцем с непрерывно-дискретным принципом слежения. Текущую освещенность предложено измерять как среднее значение токов в фотоэлементах в противоположных гранях пирамиды.

В работах [6–8] разработаны разные типы двухосевых автоматических следящих систем, которые могут поворачиваться за Солнцем в двух плоскостях.

Описана двухосевая система слежения за Солнцем, используемая в системе электроснабжения теплиц [6]. Проведены математическое моделирование в программном комплексе *COSMOS* и экспериментальные исследования разработанной системы. Результаты свидетельствуют о повышении эффективности работы фотоэлектрических преобразователей на 20–25% по сравнению с неподвижно расположенными панелями.

Для определения направления на Солнце авторами [7] использовался датчик TCS3210, состоящий из нескольких фотодиодов, преобразующих падающее излучение в постоянное напряжение величиной 3,3 В. Выполнено моделирование работы фотоэлектрических преобразователей совместно с разработанной системой слежения. Собран опытный экземпляр системы и проведены натурные эксперименты. Отмечено, что эффективность генерации мощности такой системой на 9,87% выше по сравнению со статично расположенными фотоэлектрическими панелями.

Основными элементами следящей системы [8] являлись солнечная панель с поликристаллическими фотоэлементами, четыре фоторезистора, два двигателя постоянного тока и микроконтроллер *Arduino UNO*. Фоторезисторы располагались по четырем сторонам панели. Экспериментальные исследования говорят о высокой эффективности разработанной системы слежения. Кроме того, авторами проведен анализ влияния цветных покрытий на вырабатываемую мощность солнечной панели.

Выполнена оценка эффективности работы фотоэлектрических преобразователей при использовании совместно с одно- и двухосевой системой слежения за Солнцем [9]. Показано, что поворот фотоэлектрической панели в двух плоскостях лишь незначительно, по сравнению с одноосевой системой, позволяет увеличить величину падающего на нее солнечного излучения. Моделирование проводилось на основании данных о солнечной активности на острове Кешм (Иран) летом 2011 года.

Новый тип датчика для системы слежения за Солнцем описан в работе [10]. В качестве чувствительного элемента используются кремниевые фотоэлектрические преобразователи: два лицевых – для определения положения Солнца и тыловой – для

исключения влияния рассеянного излучения. В качестве сигнала управления использовался ток короткого замыкания, зависящий от интенсивности падающего солнечного излучения и не зависящий от температуры. Показаны результаты экспериментальных исследований, проведенных с использованием разработанного датчика. В работе [11] описан алгоритм работы фотоэлектрической энергосистемы совместно с указанным датчиком слежения за Солнцем. На основе проведенного моделирования отмечается, что максимальную эффективность работы системы удается достичь при шаге поворота устройства слежения не более  $10^\circ$ , а интервал между включениями системы контроля должен составлять 30 мин.

### Постановка задачи

Известно солнечное устройство (коллектор) для обогрева помещений [12], в котором корпус образован нишей стены помещения, а абсорбер выполнен в виде подвижных вокруг своих осей пластин, расположенных горизонтально. Одна сторона пластин покрыта поглощающим материалом, а вторая – светоотражающим. С обогреваемым помещением устройство соединено подводным и отводным патрубками.

Цель работы – проанализировать эффективность работы коллектора с горизонтально и вертикально расположенными пластинами абсорбера, а также определить его производительность.

### Анализ работы коллектора

Пусть коллектор для обогрева помещений располагается на южной стене здания. В таком случае угол падения солнечного излучения на пластины абсорбера  $\theta$  может быть найден из выражения [13]:

– для горизонтально расположенных пластин

$$\cos\theta = \cos\varphi \cos\delta \cos\omega + \sin\varphi \sin\delta;$$

– для вертикально расположенных пластин

$$\cos\theta = -\sin\delta \cos\varphi \cos\gamma + \cos\delta \sin\varphi \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\gamma \sin\omega,$$

где  $\varphi$  – широта местности;  $\delta$  – склонение, т.е. угловое положение Солнца в солнечный полдень относительно плоскости экватора;  $\omega$  – часовой угол, равный нулю в солнечный полдень;  $\gamma$  – азимутальный угол плоскости, т.е. отклонение нормали к плоскости от местного меридиана.

Выражения для угла падения солнечного излучения на наклонную поверхность  $\theta_T$  выглядят следующим образом:

– для горизонтально расположенных пластин

$$\cos\theta_T = \cos(\varphi - \beta) \cos\delta \cos\omega + \sin(\varphi - \beta) \sin\delta;$$

– для вертикально расположенных пластин

$$\cos\theta_T = -\sin\delta \cos\varphi \cos(\gamma - \gamma') + \cos\delta \sin\varphi \cos(\gamma - \gamma') \cos\omega + \cos\delta \sin(\gamma - \gamma') \sin\omega,$$

где  $\beta$  – угол между рассматриваемой плоскостью и горизонтальной поверхностью;  $\gamma'$  – угол между рассматриваемой плоскостью и вертикальной поверхностью.

Для горизонтально расположенных пластин абсорбера угол  $\beta$  будет равным углу между направлением на Солнце и горизонтальной поверхностью  $\alpha_s$ . Для вертикально расположенных пластин угол  $\gamma'$  – азимуту Солнца  $\gamma_s$ .

Отношение угла падения солнечного излучения на наклонную поверхность к углу падения на горизонтальную поверхность характеризуется геометрическим коэффициентом [13]:

$$\bar{R} = D + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \left( \frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + \rho_g \left( \frac{1 - \cos\beta}{2} \right),$$

где  $D$  – функция, зависящая от целого ряда параметров, в том числе углов  $\varphi$ ,  $\delta$ ,  $\omega$ ,  $\gamma$ ,  $\theta$ ,  $\theta_T$  и т.п. [13];  $\bar{H}_d$  – величина рассеянного солнечного излучения, падающего на горизонтальную поверхность;  $\bar{H}$  – величина полного (прямого и рассеянного) солнечного излучения,

падающего на горизонтальную поверхность;  $\rho_g$  – отражательная способность земной поверхности.

В свою очередь, величина солнечного излучения, падающего на наклонную поверхность, определяется по формуле [13]

$$H_T = \bar{R}H.$$

Астрономические данные о положении Солнца были взяты для города Симферополя, расположенного на 44° с.ш. [14]. С целью оценки влияния положения пластин абсорбера на эффективность работы коллектора было проанализировано изменение падающего на него солнечного излучения в течение двух дней в году – 1 января и 11 июня 2016 г. В январе солнечная активность одна из самых низких в году, а в июне – одна из самых высоких. Изменение величины угла между направлением на Солнце и горизонтальной поверхностью  $\alpha_s$  и азимута Солнца  $\gamma_s$  показаны на рис. 1.

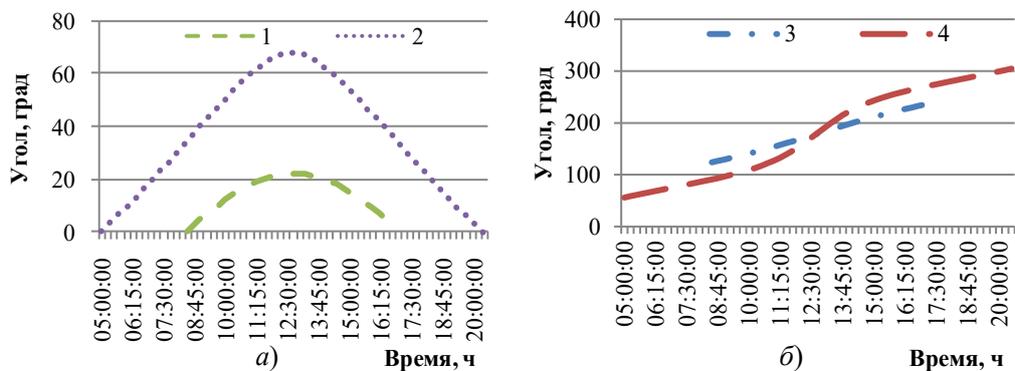


Рис. 1. Изменение положения Солнца в течение дня: 1 – изменение величины угла между направлением на Солнце и горизонтальной поверхностью 01.01.2016; 2 – изменение величины угла между направлением на Солнце и горизонтальной поверхностью 11.06.2016; 3 – изменение величины азимута Солнца 01.01.2016; 4 – изменение величины азимута Солнца 11.06.2016

Площадь поглощающей поверхности коллектора рассчитывалась с учетом взаимного затенения пластин абсорбера вследствие их поворота в направлении Солнца. Была рассчитана так называемая «полезная» площадь поглощающей поверхности, на которую попадает солнечное излучение. Получена зависимость «полезной» площади от положения Солнца, причем площадь рассчитывалась в процентах относительно всей поверхности, занимаемой коллектором. Изменение величины «полезной» площади в течение выбранных дней показано на рис. 2. Считалось, что пластины абсорбера располагаются в непосредственной близости друг к другу без промежутков.

Работа солнечного коллектора была смоделирована в программном комплексе *Matlab Simulink*. Математическая модель была построена согласно системе уравнений, составленной на основе тепловой схемы коллектора (рис. 3):

$$\begin{cases} (h_w + h_{r_{c-a}})(T_a - T_c) + (h_{c_{c-p}} + h_{r_{c-p}})(T_p - T_c) = 0; \\ (h_{c_{c-p}} + h_{r_{c-p}})(T_c - T_p) + h_{c_{f-p}}(T_f - T_p) + h_{r_{p-b}}(T_b - T_p) + S = 0; \\ h_{c_{f-p}}(T_p - T_f) + h_{c_{f-b}}(T_b - T_f) = q_u; \\ (h_{c_{f-b}}(T_f - T_b) + h_{r_{p-b}}(T_p - T_b) + (h_w + h_{r_{b-a}})(T_a - T_b) = 0, \end{cases}$$

где  $h_w$  – коэффициент конвективного теплообмена между защитным покрытием (подложкой) и атмосферой под действием ветра;  $h_{r_{c-a}}$ ,  $h_{r_{c-p}}$ ,  $h_{r_{p-b}}$ ,  $h_{r_{b-a}}$  – коэффициент теплообмена излучением между защитным покрытием и атмосферой, защитным покрытием и абсорбером, абсорбером и подложкой, подложкой и атмосферой, соответственно;

$h_{c-p}$ ,  $h_{c-f-p}$ ,  $h_{c-f-b}$  – коэффициент конвективного теплообмена между защитным покрытием и абсорбером, воздухом в канале и абсорбером, воздухом в канале и подложкой, соответственно;  $T_a$ ,  $T_c$ ,  $T_p$ ,  $T_f$ ,  $T_b$  – температура окружающей среды, защитного покрытия, абсорбера, воздуха на входе в канал, подложки, соответственно;  $S$  – величина солнечного излучения, поглощаемого единицей площади абсорбера;  $q_u$  – тепловая мощность воздушного коллектора.

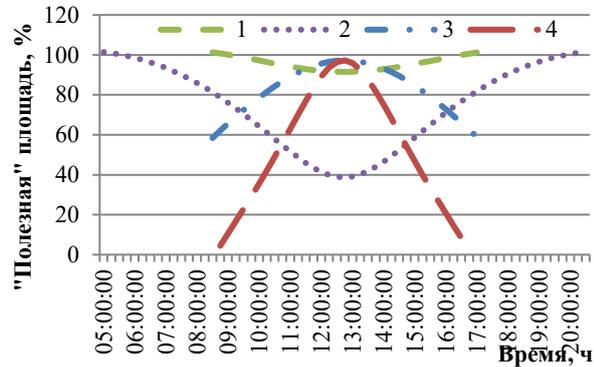


Рис. 2. Изменение величины «полезной» площади поглощающей поверхности коллектора в течение дня: 1 – горизонтальное расположение пластин 01.01.2016; 2 – горизонтальное расположение пластин 11.06.2016; 3 – вертикальное расположение пластин 01.01.2016; 4 – вертикальное расположение пластин 11.06.2016

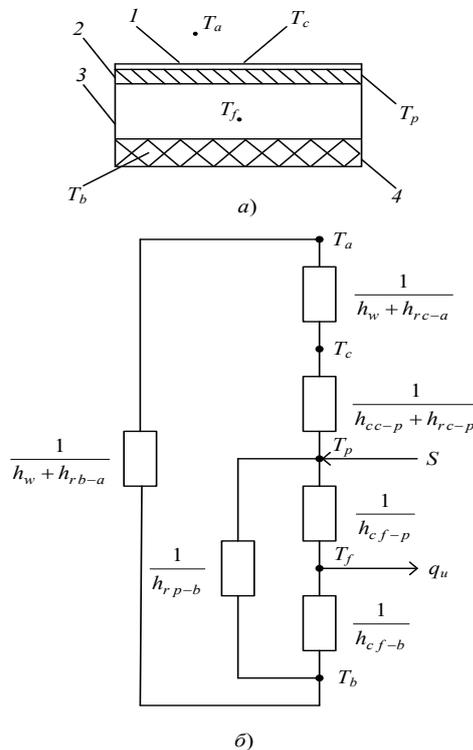


Рис. 3. Схематический вид солнечного коллектора (а) и его тепловая схема (б): 1 – защитное покрытие; 2 – абсорбер; 3 – воздушный канал; 4 – подложка

Схема соединения блоков в математической модели показана на рис. 4.

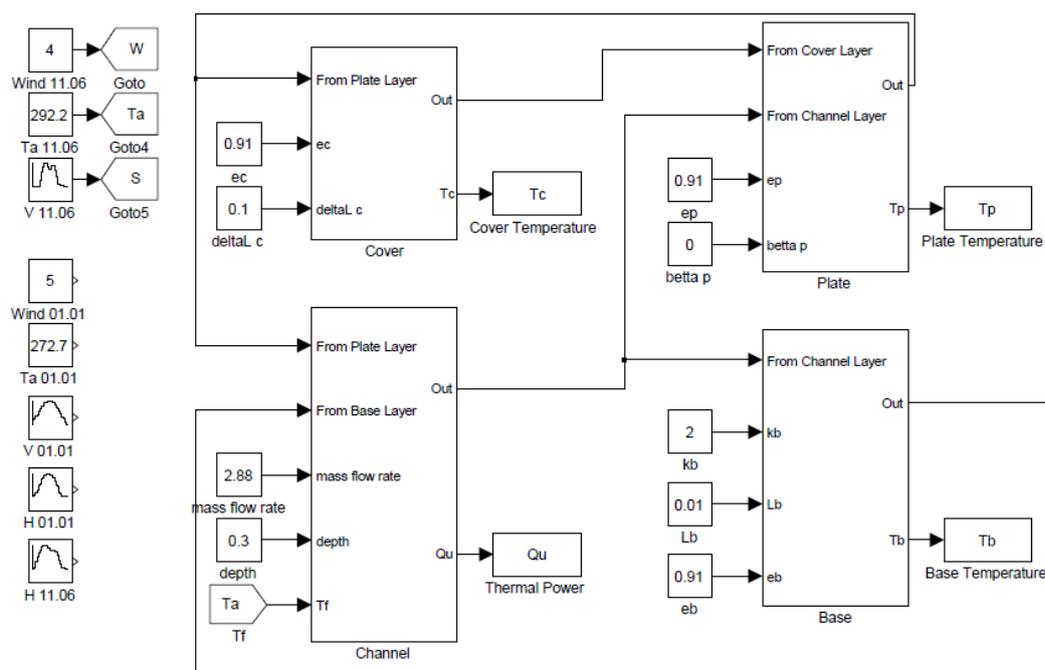


Рис. 4. Схема соединения блоков математической модели солнечного коллектора

Модель коллектора состоит из четырех вычислительных блоков (по числу элементов коллектора), в каждом из которых реализован расчет температуры поверхности соответствующего элемента и коэффициентов теплообмена. В вычислительном блоке канала вычислялась тепловая мощность коллектора. Расчет коэффициента конвективного теплообмена между элементами проводился в несколько итераций. В начале, задаваясь ориентировочным значением коэффициента, вычислялись температуры поверхностей элементов. Эти температуры использовались для уточнения значения коэффициента, который в итоге применялся для окончательного расчета температур и тепловой мощности коллектора.

Исходными данными в математической модели являлись параметры

- окружающей среды: температура ( $T_a$ ), скорость ветра ( $W$ ), величина солнечного излучения, поглощаемого единицей площади фотоэлектрической панели ( $S$ );
- элементов коллектора – степень черноты ( $e$ ), расстояние до следующего элемента ( $\Delta L$ ), угол наклона ( $\beta$ ), коэффициент теплопроводности ( $k$ ), толщина ( $L$ );
- канала: массовый расход воздуха, толщина, температура воздуха на входе в канал.

Считалось, что все падающее солнечное излучение поглощается абсорбером коллектора, т.е.  $S=H$ . Температура воздуха на входе в канал принималась равной температуре окружающей среды. Сведения о температуре окружающей среды, скорости ветра и величине солнечного излучения, падающего на единицу площади абсорбера коллектора, были взяты из [15].

Результаты моделирования работы коллектора показаны на рис. 5.

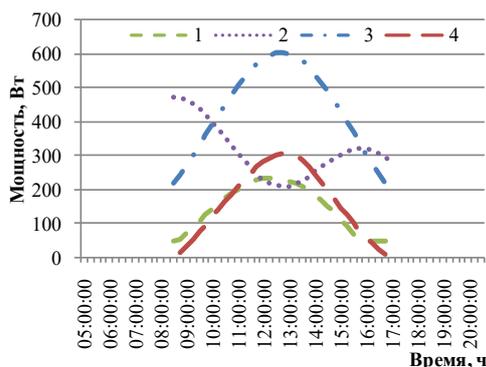


Рис. 5. Изменение величины тепловой мощности солнечного коллектора в течение дня:  
 1 – горизонтальное расположение пластин 01.01.2016; 2 – горизонтальное расположение пластин  
 11.06.2016; 3 – вертикальное расположение пластин 01.01.2016;  
 4 – вертикальное расположение пластин 11.06.2016

### Анализ результатов

Из построенных зависимостей следует, что в зимнее время наиболее эффективным является коллектор с вертикально расположенными пластинами абсорбера. Это связано с тем, что в течение дня Солнце находится невысоко над горизонтом и угол между направлением на Солнце и горизонтальной поверхностью невелик. В этом случае при повороте поглощающих пластин за Солнцем по его азимуту угол падения излучения практически равен  $90^\circ$ . Тем самым, большее количество энергии поглощается абсорбером коллектора, несмотря на большее, относительно установки с горизонтально расположенными пластинами, его затенение.

В свою очередь, в летнее время «слежение» за Солнцем по углу между направлением на Солнце и горизонтальной поверхностью является более эффективным из-за его расположения относительно горизонта. Поэтому коллектор с горизонтальными пластинами позволяет получить относительно большее количество тепловой энергии, хотя затенение абсорбера вносит значительный негативный вклад на эффективность работы установки.

И в зимний, и в летний период время работы коллектора составляет приблизительно восемь с половиной часов, с 8:30 до 17:00. В летнее время, несмотря на большую длину светового дня, генерация тепловой энергии коллектором осуществляется с момента прохождения Солнцем азимута  $90^\circ$  и до достижения азимута  $270^\circ$ , т.к. пластины абсорбера коллектора находятся на южной стороне здания.

### Заключение

Описанная методика может быть использована для расчета эффективности работы всевозможных солнечных энергетических установок, состоящих из целого ряда вращающихся приемников излучения. Такой алгоритм позволяет определить производительность установки в течение года с учетом взаимного затенения отдельных ее компонентов – абсорберов солнечного излучения.

### Литература

1. Воркунов О.В., Галиев А.А. Перспективы практического применения солнечных электроэнергетических систем в Казани // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 1–2. С. 57–60.
2. Воркунов О.В., Ихсанова А.И., Гайнутдинова А.М. Оптимальная ориентация солнечных фотоэлектрических модулей в г. Казани // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 11–12. С. 26–29.

3. Химич А.П. Повышение эффективности когенерационных энергоустановок с концентраторами солнечной энергии: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.08. Симферополь, 2015. 176 с.
4. Lee C.Y., Chou P.C., Chiang C.M., Lin C.F. Sun Tracking Systems: A Review // *Sensors* 2009. No. 9. P. 3875–3890. doi:10.3390/s90503875.
5. Аржанов К.В. Автоматизированная система непрерывно-дискретного слежения за солнцем автономных фотоэлектрических энергоустановок с использованием шаговых двигателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Томск, 2016. 178 с.
6. Zhang Q.X., Yu H.Y., Zhang Q.Y., Zhang Z.Y., Shao C.H., Yang D. A Solar Automatic Tracking System that Generates Power for Lighting Greenhouses. *Energies*. 2015. No. 8. P. 7367–7380. doi:10.3390/en8077367.
7. Algarin C.R., Castro A.O., Naranjo J.C. Dual-Axis Solar Tracker for Using in Photovoltaic Systems. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2017. Vol. 7. No. 1. P. 137–145.
8. Akbar H.S., Siddiq A.I., Aziz M.W. Microcontroller Based Dual Axis Sun Tracking System for Maximum Solar Energy Generation. *American Journal of Energy Research*. 2017. Vol. 5. No. 1. P. 23–27. doi:10.12691/ajer-5-1-3.
9. Bazyari S., Keypour R., Farhangi S., Ghaedi A., Bazyari K. A Study on the Effects of Solar Tracking Systems on the Performance of Photovoltaic Power Plants. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2014. No. 2. P. 718–728. doi:10.4236/jpee.2014.24096.
10. Китаева М.В., Юрченко А.В., Охорзина А.В., Скороходов А.В. Автономная система слежения за солнцем для солнечной энергосистемы // *Ползуновский Вестник*. 2011. № 3/1. С. 196–199.
11. Китаева М.В. Аппаратно-программный комплекс для контроля оптимальной ориентации фотоэлектрических модулей на максимальный поток солнечного излучения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13. Томск, 2014. 22 с.
12. Пат. 71088 UA, МПК F 24 J 2/28. Сонячний пристрій для обігріву приміщення / Калафатов Е.Т., Макаліш А.М., Красніченко О. Л., Калафатов І.Е. Опубл. 10.07.2012. Бюл. № 13.
13. Duffie J.A., Beckman W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 3rd Edition. UK: John Wiley & Sons Ltd, 2006. 468 с.
14. Tools for Consumers and Designers of Solar [Электронный ресурс]. URL: [https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos\\_sun.php?lang=en](https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=en) (дата обращения: 20.11.2017).
15. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія: ДСТУ-Н Б. В.1.1-27:2010. К.: Мінрегіонбуд України, 2011.

#### **Автор публикации**

**Асанов Марлен Мустафаевич** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского.

#### **References**

1. Vorkunov O.V., Galiev A.A. Perspektivy prakticheskogo primeneniya solnechnykh elektroenergeticheskikh sistem v Kazani // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2015. No. 1–2. P. 57–60.
2. Vorkunov O.V., Ikhsanova A.I., Gaynutdinova A.M. Optimal'naya orientatsiya solnechnykh fotoelektricheskikh moduley v g. Kazani // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2015. No. 11–12. P. 26–29.
3. KHimich A.P. Povyshenie effektivnosti kogeneratsionnykh energoustanovok s kontsentratorami solnechnoy energii: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.14.08. Simferopol', 2015. 176 p.
4. Lee C.Y., Chou P.C., Chiang C.M., Lin C.F. Sun Tracking Systems: A Review // *Sensors* 2009. No. 9. P. 3875–3890. doi:10.3390/s90503875.
5. Arzhanov K.V. Avtomatizirovannaya sistema nepreryvno-diskretnogo slezheniya za solntsem avtonomnykh fotoelektricheskikh energoustanovok s ispol'zovaniem shagovykh dvigateley: dis. ... kand.

tekhn. nauk: 05.13.06. Tomsk, 2016. 178 s.

6. Zhang Q.X., Yu H.Y., Zhang Q.Y., Zhang Z.Y., Shao C.H., Yang D. A Solar Automatic Tracking System that Generates Power for Lighting Greenhouses. *Energies*. 2015. No. 8. P. 7367–7380. doi:10.3390/en8077367.

7. Algarin C.R., Castro A.O., Naranjo J.C. Dual-Axis Solar Tracker for Using in Photovoltaic Systems. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2017. Vol. 7. No. 1. P. 137–145.

8. Akbar H.S., Siddiq A.I., Aziz M.W. Microcontroller Based Dual Axis Sun Tracking System for Maximum Solar Energy Generation. *American Journal of Energy Research*. 2017. Vol. 5. No. 1. P. 23–27. doi:10.12691/ajer-5-1-3.

9. Bazyari S., Keypour R., Farhangi S., Ghaedi A., Bazyari K. A Study on the Effects of Solar Tracking Systems on the Performance of Photovoltaic Power Plants. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2014. No. 2. P. 718–728. doi:10.4236/jpee.2014.24096.

10. Kitaeva M.V., YUrchenko A.V., Okhorzina A.V., Skorokhodov A.V. Avtonomnaya sistema slezheniya za solntsem dlya solnechnoy energosistemy // *Polzunovskiy Vestnik*. 2011. No. 3/1. P. 196–199.

11. Kitaeva M.V. Apparato-programmnyy kompleks dlya kontrolya optimal'noy orientatsii fotoelektricheskikh moduley na maksimal'nyy potok solnechnogo izlucheniya: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.11.13. Tomsk, 2014. 22 p.

12. Pat. 71088 UA, MPK F 24 J 2/28. Sonyachniy pristiriy dlya obigrivu primischennya / Kalafatov E.T., Makalish A.M., Krasnichenko O. L., Kalafatov I.E. Opubl. 10.07.2012. Byul. No. 13.

13. Duffie J.A., Beckman W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 3rd Edition. UK: John Wiley & Sons Ltd, 2006. 468 p.

14. Tools for Consumers and Designers of Solar [Elektronnyy resurs]. URL: [https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos\\_sun.php?lang=en](https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=en) (data obrascheniya: 20.11.2017).

15. Zakhist vid nebezpechnikh geologichnikh protsesiv, shkidlivikh ekspluatatsiy vpliviv, vid pozhezhi. *Budivel'na klimatologiya: DSTU-N B. V.1.1-27:2010*. K.: Minregionbud Ukraïni, 2011.

#### **Author of the publication**

**Marlen M. Asanov** - cand. sci. (phys.-math.), assistant professor, Department «Electrical Energy and Electrical Engineering Department», V.I. Vernadsky Crimean Federal University.

*Поступила в редакцию*

*10 декабря 2017 г.*

# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.313

## ВЛИЯНИЕ ЛЮФТА НА АМПЛИТУДУ ОБМЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ МОЩНОСТИ В АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

А.Е. Савенко, П.С. Савенко

Керченский государственный морской технологический университет,  
г. Керчь, Республика Крым, Россия  
*Savenko-70@mail.ru*

**Резюме:** Рассмотрено применение автономных электротехнических комплексов, имеющих в своем составе параллельно работающие дизель-генераторные агрегаты на основе синхронных генераторов. Описана проблема существования обменных колебаний мощности в таких технических системах. Разработана математическая модель, позволяющая проводить исследования автономного электротехнического комплекса. Получена методика построения карт зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта в контурах регулировки частоты вращения дизель-генераторов. Использование таких карт позволяет ввести рекомендации по ограничению амплитуды обменных колебаний в нормативные документы как общего характера, так и конкретно для определенных типов оборудования. Также карты дают возможность определять существующие в контуре регулирования частоты зазоры люфта по измененным амплитудам обменных колебаний мощности.

**Ключевые слова:** обменные колебания мощности, параллельная работа, автономный электротехнический комплекс, генераторный агрегат, экспериментальные исследования.

**DOI:** 10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-46-54

## INFLUENCE OF BACKLASH ON AMPLITUDE OF EXCHANGE POWER FLUCTUATIONS IN AUTONOMOUS ELECTRIC POWER EQUIPMENT

A.E. Savenko, P.S. Savenko

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea Russia  
*Savenko-70@mail.ru*

**Abstract:** The application of autonomous electric power equipment having in their composition parallel operating diesel-generator sets on the basis of synchronous generators is considered. The problem of existence of exchange power fluctuations in such technical systems is described. A mathematical model has been developed that makes it possible to carry out investigations of an autonomous electric power equipment. The technique for constructing maps of the amplitude of the exchange power fluctuations, from the backlash gaps in the speed control circuits of diesel generators is obtained. The use of such cards makes it possible to introduce recommendations on limiting the amplitude of exchange power fluctuations to normative documents, both of a general nature, and specifically for certain types of equipment. In the same

*way, the cards make it possible to determine the gap gaps existing in the frequency control loop from the measured amplitudes of the exchange power fluctuations.*

**Keywords:** *exchange power fluctuations, parallel operation, autonomous electric power equipment, generating set, experimental research.*

### **Введение**

Автономные электротехнические комплексы с использованием параллельной работы дизель-генераторных агрегатов находят широкое применение в различных сферах экономики и повседневной жизни Российской Федерации [1; 2].

Применение электрогенераторных установок в медицинских учреждениях является обязательным и устанавливается законодательством. Еще одной сферой применения автономных электростанций являются промышленные предприятия. Особенно это касается производств, где используются холодильные установки или скоропортящаяся продукция. Базовые станции телекоммуникационных центров, обеспечивающие сигнал для мобильных устройств, также должны быть полностью защищены от перебоев электричества. Удаленные строительные площадки требуют электропитания для функционирования техники и инструмента, а качество и скорость строительства объектов находится в очевидной зависимости от наличия и качества электроэнергии [3]. Дизельные электростанции незаменимы при полевых работах геологов и археологов. Передвижные дизельные автоматизированные электростанции широко используются в сельском и лесном хозяйстве, а также в экспедициях, связанных с геолого-разведочными работами. В этих условиях электростанции могут быть использованы в качестве источника электроэнергии для запуска механизмов, освещения, как резервные источники питания [4; 5].

В армии дизельные генераторы выступают в роли надежного и стабильного альтернативного источника питания, который обеспечивает выполнение поставленных задач, комфортное проживание военнослужащих, установление связи и безопасность временных военно-полевых баз. В случае крупных энергетических аварий или техногенных катастроф дизельные электростанции военного образца могут быть быстро переброшены в любую точку, быстро и эффективно участвовать в спасательных работах и наладить аварийное энергоснабжение пострадавших районов.

Автономные электротехнические комплексы на борту военных и торговых морских и речных судов имеют в своем составе дизель-генераторные электростанции [6; 7].

Экспериментальные исследования, проведенные в автономных электротехнических комплексах, выявили существование обменных колебаний мощности при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов на основе синхронных генераторов переменного тока [8]. Именно такие генераторы чаще всего используются для производства электрической энергии [9; 10], качество которой значительно ухудшается из-за обменных колебаний мощности. Низкое качество производимой электроэнергии приводит к повышенному расходу топлива, появлению дополнительных расходов, связанных с ремонтом оборудования, нарушают устойчивость работы энергосистемы [11].

Исследования доказали, что основной причиной возникновения обменных колебаний мощности между генераторами является люфт в контурах регулирования скорости дизель-генераторных агрегатов [8]. Разработаны методы и средства, направленные на устранение обменных колебаний [12; 13]. Однако в документах, регламентирующих работу автономных электротехнических комплексов, не содержится норм и требований касательно обменных колебаний мощности. Поэтому актуальным является проведение исследований, направленных на построение карт зависимости амплитуды обменных колебаний от значений зазоров люфтов параллельно работающих генераторных агрегатов. Это позволит оценить допустимые значения люфтов с точки зрения устойчивости работы автономного электротехнического комплекса и определит границы применения методов и средств по устранению обменных колебаний мощности.

### Методы исследования

Для исследования работы электростанции автономного электротехнического комплекса используется математическая модель [14; 15], позволяющая построить графики мгновенных значений основных параметров параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов.

Синхронные генераторы моделируются уравнениями Парка-Горева, которые описывают происходящие переходные электромагнитные и электромеханические процессы в  $d$  и  $q$  координатах, неподвижных относительно ротора:

$$\begin{aligned}\frac{d\psi_{sd}}{d\tau} &= \psi_{sq}\omega_r - r_s i_{sd} - u_{sd}, \\ \frac{d\psi_{sq}}{d\tau} &= -\psi_{sd}\omega_r - r_s i_{sq} - u_{sq}, \\ \frac{d\psi_f}{d\tau} &= u_f - r_f i_f,\end{aligned}$$

где  $\psi_{sd}$ ,  $\psi_{sq}$  – проекции векторов потокосцеплений статора на оси  $d$ ,  $q$ ;  $u_{sd}$ ,  $u_{sq}$  – проекции вектора напряжения;  $r_s$  – сопротивление статорной обмотки;  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  – проекции вектора тока;  $\psi_f$ ,  $i_f$ ,  $u_f$ ,  $r_f$  – потокосцепление, ток, напряжение и сопротивление обмотки возбуждения;  $\tau$  – относительное время.

$$\psi_{sd} = (L_d + L_{sd})i_{sd} + L_d i_f,$$

$$\psi_{sq} = (L_q + L_{sq})i_{sq},$$

$$\psi_f = L_d i_{sd} + L_f i_f,$$

где  $L_{sd}$ ,  $L_{sq}$  – индуктивности рассеяния статорной обмотки;  $L_d$ ,  $L_q$  – индуктивности главного контура намагничивания по осям  $d$ ,  $q$ ;  $L_f$  – индуктивность обмотки возбуждения.

Бесщеточный синхронный генератор имеет в своем составе возбудитель и пропорциональный регулятор напряжения, которые описаны следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{du_f}{dt} = [-u_f + K_f(U_0 - u_m)]/T_B,$$

где  $K_f$  – коэффициент передачи регулятора;  $u_m = \sqrt{u_{sd}^2 + u_{sq}^2}$ ;  $U_0$  – задание по напряжению.

В математической модели используется уравнение дизеля, который является приводным двигателем агрегата, в упрощенной форме:

$$\begin{aligned}J_m \frac{d\omega_r}{d\tau} &= M_d - M_g, \\ M_d &= K_m h, \quad M_g = \psi_{sq} i_{sd} - \psi_{sd} i_{sq},\end{aligned}$$

где  $J_m$  – приведенный момент инерции вала дизеля и ротора генератора;  $M_d$  – механический момент дизеля;  $M_g$  – электромагнитный момент сопротивления, развиваемый генератором;  $h$  – положение топливной рейки;  $K_m$  – коэффициент усиления дизеля по частоте вращения.

Отдельным уравнением описан регулятор частоты вращения дизеля, который представлен аperiодическим звеном первого порядка:

$$T_{\omega} \frac{dh}{dt} = K_{\omega} U_{\varepsilon} - h,$$

где  $T_{\omega}$  – постоянная времени исполнительного механизма;  $K_{\omega}$  – коэффициент усиления регулятора;  $U_{\varepsilon}$  – сигнал рассогласования между заданной  $\omega_{r0}$  и действительной  $\omega_r$  частотами вращения дизеля.

Основной задачей исследования является вопрос: как влияет явление люфта в контуре регулирования частоты вращения дизеля на параметры автономного электротехнического комплекса, поэтому принимаем за основную характеристику люфта его зазор  $D_n$  (рис. 1) и используем следующее математическое описание, позволяющее решить поставленную задачу:

$$U_{\varepsilon} = \left\{ \begin{array}{l} U_{\varepsilon} = \text{const для } |U_{\varepsilon} - k\varepsilon| \leq D_n \\ k \left( \varepsilon - D_n \text{sign} \left( \frac{dU_{\varepsilon}}{dt} \right) \right) \text{ для } \frac{dU_{\varepsilon}}{dt} \neq 0 \end{array} \right\},$$

где  $k$  – коэффициент передачи;  $D_n$  – зазор люфта;  $\varepsilon$  – рассогласование между заданной  $\omega_{r0}$  и действительной  $\omega_r$  частотами вращения дизеля.

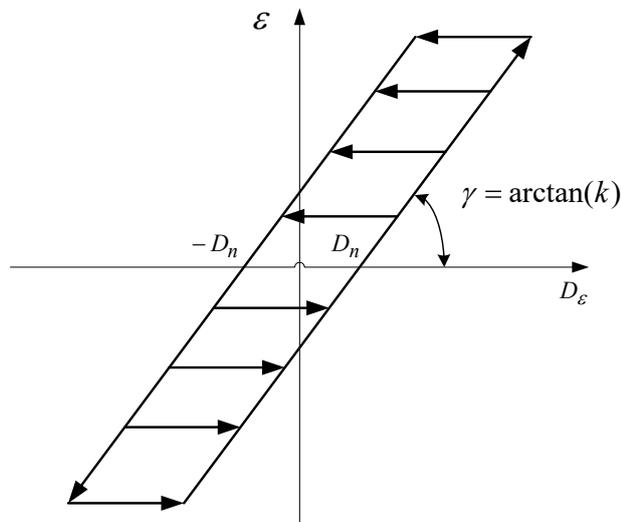


Рис. 1. Характеристика типа люфт

Математическая модель позволяет провести необходимые исследования для автономного электротехнического комплекса, в котором два параллельно включенных дизель-генераторных агрегата работают на общую активно-индуктивную нагрузку. Такая компоновка дает возможность анализа обменных колебаний мощности, возникающих при параллельной работе генераторов в квазиустановившихся режимах.

В систему уравнений также включены уравнения связи для преобразования токов статоров генераторных агрегатов в неподвижную систему координат  $(\alpha, \beta)$  из вращающейся системы координат  $(d, q)$ , жестко связанной с ротором,

$$i_{\alpha} = i_{sd} \cos \omega_r t - i_{sq} \sin \omega_r t, \quad i_{\beta} = i_{sq} \cos \omega_r t - i_{sd} \sin \omega_r t.$$

На рис. 2 показаны графики  $U_{a1}, U_{a2}$  – напряжения;  $Mg1, Mg2$  – моменты;  $I_{a1}, I_{a2}$  – токи;  $\omega_{21}, \omega_{21}$  – частоты вращения роторов параллельно работающих генераторов для значений зазоров люфтов, соответственно  $D_{n1}=0,002$  и  $D_{n2}=0,01$ . Результаты

моделирования подтверждают существование обменных колебаний мощности и позволяют определить их амплитуду. Для этой цели будем использовать токи  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$  параллельно работающих генераторов.

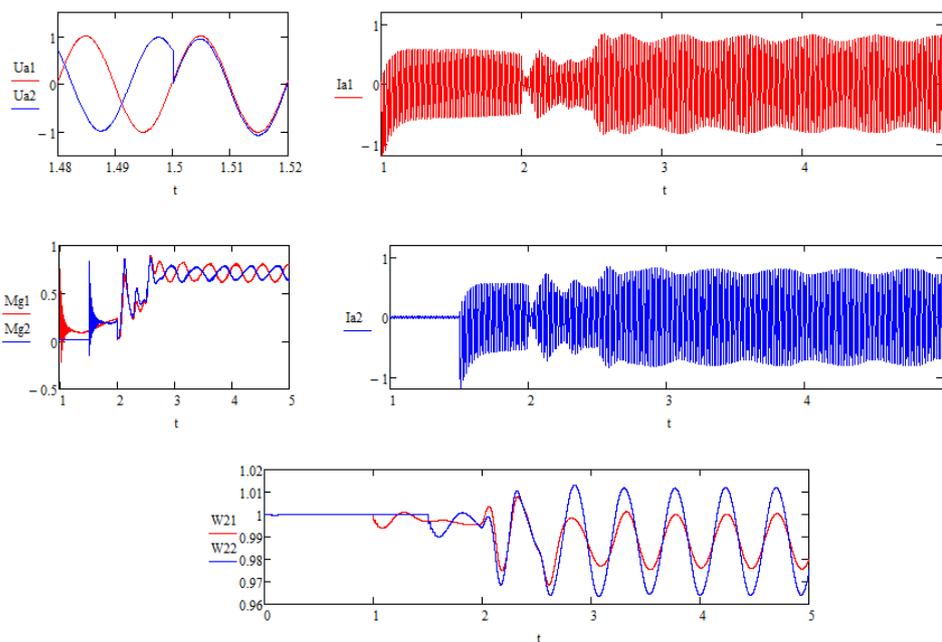


Рис.2. Результаты моделирования

### Результаты

Для проведения исследований с использованием математической модели использованы данные автономного электротехнического комплекса парома «Ейск» (рис. 3) Керченской паромной переправы, осуществляющего регулярные грузопассажирские перевозки между портами «Крым» и порт «Кавказ». На этом же судне проводились экспериментальные исследования и выявлены обменные колебания мощности во всех режимах работы его электростанции [8].



Рис. 3. Паром Ейск

Результаты моделирования показали, что устойчивая работа судового электротехнического комплекса возможна при значениях зазоров люфта от 0 до 0,02. Поэтому, именно в этих диапазонах изменения зазоров люфта, с шагом 0,002 проведены вычисления и определены соответствующие амплитуды обменных колебаний мощности. Результаты представлены в таблице и на рис. 4.

Зависимость амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта

Dn1/Dn2	0	0,002	0,004	0,006	0,008	0,01	0,012	0,014	0,016	0,018	0,02
0	0	0,011	0,021	0,031	0,04	0,052	0,065	0,071	0,083	0,095	0,1
0,002	0,01	0,0015	0,011	0,021	0,033	0,045	0,056	0,068	0,076	0,09	0,1
0,004	0,02	0,01	0,002	0,012	0,021	0,035	0,045	0,056	0,068	0,076	0,09
0,006	0,028	0,018	0,007	0,003	0,013	0,024	0,034	0,048	0,057	0,07	0,081
0,008	0,04	0,03	0,02	0,0065	0,0025	0,0135	0,024	0,036	0,048	0,058	0,068
0,01	0,05	0,04	0,03	0,018	0,0075	0,0062	0,0145	0,024	0,039	0,048	0,058
0,012	0,065	0,051	0,038	0,028	0,0165	0,007	0,004	0,015	0,025	0,038	0,048
0,014	0,075	0,063	0,052	0,04	0,028	0,015	0,006	0,004	0,015	0,027	0,039
0,016	0,09	0,08	0,063	0,051	0,04	0,0255	0,015	0,0045	0,006	0,015	0,027
0,018	0,1	0,09	0,075	0,06	0,051	0,036	0,027	0,015	0,045	0,0075	0,015
0,02	0,117	0,1	0,086	0,075	0,062	0,05	0,04	0,027	0,015	0,006	0,0065

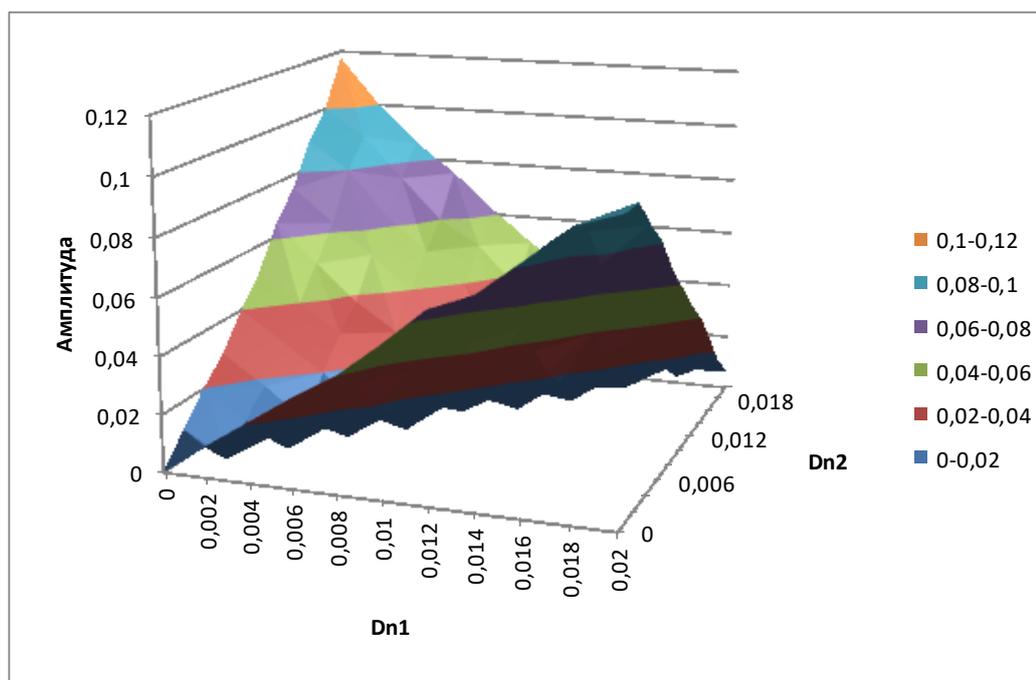


Рис. 4. Карта зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта. Dn1 и Dn2 – зазоры люфта первого и второго параллельно работающего дизель-генератора соответственно

Графическое представление зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта представляет собой карту настроек, которая может использоваться специалистами при наладке и эксплуатации регуляторов частоты вращения генераторных агрегатов. Кроме того, такая карта может быть применена в системах автоматики, ограничивающих обменные колебания мощности. Амплитуда обменных колебаний карты на рис. 4 достигает 11–12%, что является достаточно большой величиной и требует применения ограничивающих мер и средств. Наличие небольших зазоров люфта в контурах регулирования частоты параллельно работающих генераторных

агрегатов является технически необходимым условием для обеспечения их работоспособности. Поэтому и обменные колебания мощности могут иметь место. Однако ситуация, когда они достигают значительных значений, недопустима. В связи с тем, что предельные значения амплитуды обменных колебаний нигде не прописаны, возникают сложности при их ограничении. Исходя из полученной карты целесообразно было бы установить предельно допустимые нормы: 4–5%.

### Обсуждение

Результаты проведенных исследований подтвердили, что амплитуда обменных колебаний мощности параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов зависит от значений зазоров люфта в контурах регулирования частот вращения. Из таблицы и рисунка видно, что в случае отсутствия люфта, когда зазоры равны нулю, амплитуда обменных колебаний также равна нулю, то есть колебания отсутствуют. При увеличении значений зазоров  $D_{n1}$  и  $D_{n2}$  растет и амплитуда обменных колебаний. Видно, что при равных значениях зазоров колебания меньше, однако это является очень частным случаем и на практике может встретиться крайне редко. С ростом разницы значений зазоров амплитуда значительно увеличивается. Полученная карта (рис. 4), кроме общей информации, детально описывает обменные колебания мощности для дизель-генераторов 6VD26/20-AL-2 с генераторами S450MG 800кВА и может быть полезна специалистам, которые эксплуатируют и настраивают такие агрегаты. Аналогичные исследования, направленные на построение карт зависимости амплитуд обменных колебаний мощности от значений зазоров люфтов, могут быть проведены для любых дизель-генераторов.

### Заключение

Полученные в статье результаты являются логическим продолжением работы [8], посвященной исследованию обменных колебаний мощности при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов в составе автономных электротехнических комплексов. Они позволяют оптимизировать эксплуатацию таких технических систем. Получена методика построения карт зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от значений зазоров люфтов. На основе карт могут быть введены рекомендации по ограничению амплитуды обменных колебаний в нормативные документы как общего характера, так и конкретно для определенных типов оборудования. Также карты дают возможность определять существующие в контуре регулирования частоты зазоры люфта по измеренным амплитудам обменных колебаний.

### Литература

1. Бурянина Н.С., Корольюк Ю.Ф. Качество электроэнергии и потери мощности в автономных системах республики Саха (Якутия) // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2007. № 1. С. 56–59.
2. Федоров О.В., Сарваров А.С., Шевырев Ю.В. Ресурсное обеспечение новых технологических укладов в промышленности. М.: Кнорус, 2016. 142 с.
3. Лежнюк П.Д., Нетребский В.В., Никиторович А.В. Оптимизация распределения нагрузки между рассредоточенными источниками энергии в локальной электрической системе // Технічна електродинаміка. 2012. № 2. С. 38-39.
4. Грачева Е.И., Садыков Р.Р. Исследование вероятностных характеристик систем электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19, № 1–2. С. 95–101.
5. Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В., Ваньков Ю.В. Измерительно-диагностический комплекс для диагностики энергетических установок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 3–4. С. 109–114.
6. Хватов О.С., Дарьенков А.Б. Электростанция на базе дизель-генератора переменной частоты вращения // Электротехника. 2014. № 3. С. 28–32.
7. Калмыков А.Н., Кузнецов В.И., Сеньков А.П., Токарев Л.Н. Судовые

- бестрансформаторные гребные электрические установки // *Морской вестник*. 2013. № 1. С. 40–42.
8. Савенко А.Е., Голубев А.Н. Обменные колебания мощности в судовых электротехнических комплексах // *Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина*. Иваново, 2016. 172 с.
9. Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen and Val'eria Hrabovcov'a. Design of Rotating Electrical Machines. Wiley & Sons, Ltd. 2008. 531 p.
10. Reimert D. Protective relaying for power generation systems. Taylor and Francis Group, LLC, 2006. 545 p.
11. Конкс Г.А., Лашко В.А. Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта. М.: Машиностроение, 2005. 512 с.
12. Савенко А.Е. Устранение обменных колебаний мощности в автономных электротехнических комплексах. Материалы II Международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли». Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт. 2017. Т. 3. С. 22–27.
13. Тютиков В.В., Воронин А.И. Методика синтеза регуляторов для независимого формирования статических и динамических показателей нелинейных объектов // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2015. № 3 (164). С. 154–164.
14. Савенко А.Е. Математическая модель судового электротехнического комплекса // *Вестник ИГЭУ*. 2015. № 5. С. 54–59.
15. Голубев А.Н., Мартынов В.А., Алейников А.В. Математическая модель для расчета электромагнитных сил в синхронном электроприводе с постоянными магнитами // *Вестник ИГЭУ*. 2015. № 1. С. 10–13.

#### **Авторы публикации**

***Савенко Александр Евгеньевич*** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование судов и автоматизация производства» Керченского государственного морского технологического университета.

***Савенко Павел Станиславович*** – курсант морского факультета Керченского государственного морского технологического университета.

#### **References**

1. Buryanina N.S., Korolyuk Yu.F. Kachestvo elektroenergii i poteri moschnosti v avtonomnykh sistemakh respubliki Sakha (Yakutiya). Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova. 2007. No. 1. p. 56–59.
2. Fedorov O.V., Sarvarov A.S., SHEvyrev Yu.V. Resursnoe obespechenie novykh tekhnologicheskikh ukladov v promyshlennosti. M.: Knorus, 2016. 142 p.
3. Lezhnyuk P.D., Netrebskiy V.V., Nikitorovich A.V. Optimizatsiya raspredeleniya nagruzki mezhdru rassredotochennymi istochnikami energii v lokal'noy elektricheskoy sisteme // Tekhnichna elektrodinamika. 2012. No. 2. P. 38–39.
4. Gracheva E.I., Sadykov R.R. Issledovanie veroyatnostnykh kharakteristik sistem elektrosnabzheniya // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. 2017. Vol. 19. No. 1–2. P. 95–101.
5. Nizamiev M.F., Ivshin I.V., Vladimirov O.V., Van'kov YU.V. Izmeritel'no-diagnosticheskiy kompleks dlya diagnostiki energeticheskikh ustanovok // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. 2014. No. 3–4. P. 109–114.
6. KHvatov O.S., Dar'enkov A.B. Elektrostantsiya na baze dizel'-generatora peremennoy chastoty vrascheniya // Elektrotekhnika. 2014. No. 3. P. 28–32.
7. Kalmykov A.N., Kuznetsov V.I., Sen'kov A.P., Tokarev L.N. Sudovye bestransformatornye grebnye elektricheskie ustanovki // Morskoy vestnik. 2013. No. 1. P. 40–42.
8. Savenko A.E., Golubev A.N. Obmennye kolebaniya moschnosti v sudovykh elektrotekhnicheskikh kompleksakh // Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet imeni V.I.

Lenina. Ivanovo, 2016. 172 p.

9. Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen and Val'eria Hrabovcov'a. Design of Rotating Electrical Machines. Wiley & Sons, Ltd. 2008. 531 p.

10. Reimert D. Protective relaying for power generation systems. Taylor and Francis Group, LLC, 2006. 545 p.

11. Konks G.A., Lashko V.A. Mirovoe sudovoe dizelestroenie. Kontseptsii konstruirovaniya, analiz mezhdunarodnogo opyta. M.: Mashinostroenie, 2005. 512 p.

12. Savenko A.E. Ustranenie obmennykh kolebaniy moschnosti v avtonomnykh elektrotekhnicheskikh kompleksakh. Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Dostizheniya, problemy i perspektivy razvitiya neftegazovoy otrasli». Al'met'evsk: Al'met'evskiy gosudarstvennyy neftyanoy institut. 2017. Vol. 3. P. 22–27.

13. Tyutikov V.V., Voronin A.I. Metodika sinteza regulyatorov dlya nezavisimogo formirovaniya staticheskikh i dinamicheskikh pokazateley nelineynykh ob"ektov // Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki. 2015. No. 3 (164). P. 154–164.

14. Savenko A.E. Matematicheskaya model' sudovogo elektrotekhnicheskogo kompleksa // Vestnik IGEU. 2015. No. 5. P. 54–59.

15. Golubev A.N., Martynov V.A., Aleynikov A.V. Matematicheskaya model' dlya rascheta elektromagnitnykh sil v sinkhronnom elektroprivode s postoyannymi magnitami // Vestnik IGEU. 2015. No. 1. P. 10–13.

#### **Authors of the publication**

*Alexandr E. Savenko* – cand. sci. (techn.), associate professor, Department «Electrical Equipment of Ships and Industrial Automation», Kerch State Maritime Technological University. E-mail: Savenko-70@mail.ru

*Pavel S. Savenko* – marine faculty cadet, Kerch State Maritime Technological University.

*Поступила в редакцию*

*13 февраля 2018 г.*

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 004.02:621:628.9

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ОЦЕНКИ ФЛИКЕРА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА С РАЗНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ К КОЛЕБАНИЯМ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

К.Е. Лисицкий

Братский государственный университет, г. Братск

lisitskiyke@gmail.com

*Резюме:* В статье рассмотрена проблема достоверной оценки фликера при использовании источников света с разной чувствительностью к колебаниям напряжения в электрической сети. Предложен подход к совершенствованию стандартных методов оценки фликера. Дано описание и результаты использования аппаратно-программного комплекса, позволяющего проводить исследования чувствительности источников света к колебаниям напряжения.

*Ключевые слова:* фликер, колебания напряжения, источники света, колебания светового потока, нормализованная частотная характеристика прибора.

*DOI:*10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-55-66

## IMPROVEMENT METHODS AND MEANS OF FLEAKER EVALUATION WHEN USING LIGHT SOURCES WITH DIFFERENT SENSITIVITY TO VOLTAGE FLUCTUATIONS IN THE ELECTRICAL NETWORK

K.E. Lisitskiy

Bratsk state university, Bratsk

lisitskiyke@gmail.com

*Abstract:* The article considers the problem of reliable evaluation of flicker in electrical networks. The technique for calculating the normalized frequency characteristics of the instrument for light sources with different sensitivity to voltage fluctuations is presented, which is aimed at improving the standard methods for estimating the flicker. A technique for the normalization of the flicker is

*described on the basis of the data of the estimated estimation of the voltage fluctuations in the electric network.*

**Keywords:** *flicker, voltage fluctuations, light sources, fluctuations in the light flux, normalized frequency response of the instrument.*

### **Введение**

Одним из самых серьёзных последствий колебания напряжения (КН) в электрической сети являются изменения светового потока искусственных источников освещения, воспринимаемые человеком как мерцание света. В зарубежных и отечественных стандартах [1; 2] это явление называют «фликер». Фликер вызывает у человека утомление, в связи с чем возникает увеличение брака продукции и травматизма на производстве [3]. Именно поэтому в российских нормах качества электроэнергии [4] фликеру уделяется первостепенное внимание при оценке КН.

В отечественных нормативно-технических документах [1] представлены параметры КН в электрической сети, при которых у ламп накаливания мощностью 60 Вт возникает фликер. В последние годы широкое распространение получили лампы с отличающейся от ламп накаливания чувствительностью к КН [5÷7], что затрудняет их достоверную оценку методами, представленными в стандарте [8]. Недостоверная оценка фликера может приводить к проведению неэффективных мероприятий по нормализации фликера.

### **Нормы фликера**

Оценка соответствия КН нормам качества электрической энергии осуществляется по значениям кратковременной дозы фликера  $P_{st}$  – меры фликера, оцениваемой в течение 10 мин., и длительной дозы фликера  $P_{lt}$  – меры фликера, оцениваемой в течение двух часов по последовательным значениям  $P_{st}$ .

В точках передачи электрической энергии пользователям величина  $P_{st}$  не должна превышать 1,38 о.е., величина  $P_{lt}$  не должна превышать 1 о.е [4]. В свою очередь, в точках общего присоединения потребителей электрической энергии с лампами накаливания в помещениях со значительным зрительным напряжением величина  $P_{st}$  не должна превышать 1 о.е., а величина  $P_{lt}$  не должна превышать 0,65 о.е [8]. Эти нормы используются для ограничения изменений напряжения, КН и фликера, вызываемых оборудованием, подключаемым к электрическим сетям низковольтных систем электроснабжения (СЭС) общего назначения и оказывающим негативное влияние на них.

### **Аналитические методы оценки фликера**

Основой для оценки фликера является характеристика изменения напряжения на зажимах потребителя. При этом определяется разность напряжений  $\Delta U$  между двумя последовательными значениями огибающей среднеквадратичных значений фазных напряжений в моменты времени  $t_1$  и  $t_2 - U(t_1)$  и  $U(t_2)$  соответственно [3]:

$$\Delta U = U(t_1) - U(t_2). \quad (1)$$

В соответствии со стандартом [8] уровень КН характеризуется амплитудой относительных изменений напряжения  $d$ , которую определяют по следующему выражению:

$$d = \frac{U(t_1) - U(t_2)}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение электрической сети, В.

В рекомендациях по контролю гармоник в электроэнергетических системах [9], рекомендациях по производству и распределению электроэнергии на промышленных

предприятиях [10] и нормах качества электрической энергии в электрических сетях общего назначения [11] представлены параметры кривой допустимых КН (рис. 1): значения амплитуды относительных изменений напряжения  $d_{P_{st}=1}$ , соответствующие порогу восприятия фликера в зависимости от частоты изменений напряжения  $r$ . Кривая допустимых КН, полученная при использовании ламп накаливания мощностью 60 Вт, соответствует изменениям напряжения прямоугольной формы.

В соответствии с ГОСТ [12] порог восприятия фликера – это минимальная величина изменения яркости световых источников, приводящая к ощущаемости мерцаний. Ему соответствует уровень  $P_{st}=1$  о.е.

Все известные аналитические методы оценки фликера основаны на использовании кривой допустимых КН. Они предполагают определение амплитуды относительных изменений напряжения  $d_o$  для КН прямоугольной формы, при которых наблюдаются такие же уровни фликера, что и при КН различной формы.

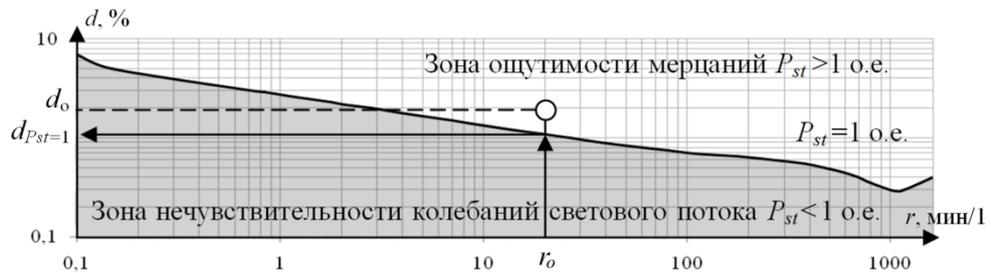


Рис. 1. Кривая допустимых КН

Если повторяющиеся прямоугольные КН происходят с частотой  $r_o$  и амплитудой  $d_o$ , то значение  $P_{st}$  определяют как

$$P_{st} = \frac{d_o(r_o)}{d_{P_{st}=1}(r_o)}, \quad (3)$$

где  $d_{P_{st}=1}$  – амплитуда относительных изменений напряжения, соответствующая ординате кривой допустимых КН.

Для расчета  $P_{st}$  при повторяющихся КН формы, отличной от прямоугольных, используют следующую зависимость [3]:

$$P_{st} = 0,365 \cdot d \cdot F \cdot r^{0,31}, \quad (4)$$

где  $F$  – коэффициент эквивалентности, зависящий от формы КН, о.е.

Прямоугольные КН имеют коэффициент эквивалентности  $F=1$  о.е. Для КН другой формы  $F < 1$  о.е. Графики для определения значений  $F$  при КН различной формы представлены в стандарте [8].

Для оценки фликера в узлах сетей с источником КН, имеющим известное значение  $P_{st}$ , можно воспользоваться методом коэффициента распределения напряжения [13]. Данный подход предполагает, что элементы электрической сети имеют преимущественно индуктивный характер. Поэтому форма изменений напряжения в узлах высокого и низкого напряжения с высокой точностью соответствует форме изменений напряжения источника. Наличие конденсаторных батарей в составе нагрузок значительно снижает точность оценки фликера. По этой причине область применения метода ограничивается расчетом уровней фликера на этапе проектирования электрической сети.

В работе [14], объектами исследований которой являются СЭС деревообрабатывающих производств, для оценки фликера предлагается использовать график электрических нагрузок, получение которого требует длительных измерений активной и реактивной мощностей нагрузки электродвигателей и статистического анализа

результатов измерений. Определенные в результате статистического анализа значения  $d$  используются в дальнейшем для расчета значений  $P_{st}$ .

Однако такой подход к оценке фликера достаточно трудоёмкий. Область его применения весьма узкая. Предложенная методика не может быть использована при КН, имеющих случайный характер, например в СЭС литейного производства с дуговыми сталеплавильными печами и т.д.

#### Метод непосредственных измерений $P_{st}$

Основным подходом к оценке фликера является метод непосредственных измерений  $P_{st}$  с помощью фликерметров [3]. Функциональные и конструктивные требования к ним представлены в стандарте [1].

Известны два способа реализации фликерметров: на аналоговых элементах и с применением цифровой элементарной базы. В настоящее время основной концепцией при создании фликерметров является использование микроконтроллеров, способных на практике реализовать любой математический аппарат.

Процесс зрительного восприятия фликера моделируется на основе теории прохождения сложного сигнала через нелинейную динамическую систему [3].

В 1986 г. Международный союз по использованию электрической энергии совместно с Международной электротехнической комиссией предложили функциональную схему фликерметра [15]. Эта схема используется и в действующем отечественном стандарте [1]. В соответствии с ней фликерметр состоит из пяти последовательно включенных блоков: 1) адаптера входного напряжения; 2) квадратичного умножителя; 3) взвешивающих фильтров; 4) блока квадратичной обработки и сглаживания; 5) блока статистического анализа. Восприятие фликера при подаче КН на лампу моделируется нелинейной характеристикой, обеспечиваемой блоками 1÷4. Сигнал на выходе блока 4 представляет собой мгновенное значение фликера  $P_{inst}$ . Блок 5 осуществляет анализ уровня фликера для расчета значений  $P_{st}$  и  $P_{lt}$ .

Обобщенная частотная характеристика блоков 1÷4 в стандарте [1] называется «нормализованная частотная характеристика прибора» (НЧХП). Она является аналогом кривой допустимых КН и представлена в табличной форме – в виде значений частоты возникновения КН  $f_{кн}$  и соответствующих им значений зависимости  $d$ , при которых  $P_{inst}=1$  о.е. (рис.2). В общем случае НЧХП используется для калибровки фликерметров.

Следует отметить, что НЧХП, представленная в стандарте [1], получена для применения ламп накаливания мощностью 60 Вт.

Проблема достоверной оценки фликера осложняется тем, что в настоящее время широкое распространение получили источники света, имеющие иной принцип действия, по сравнению с лампами накаливания. Это отличие обуславливает разницу в чувствительности таких источников света к КН в электрической сети [16].



Рис. 2. Графическая интерпретация НЧХП

На рис. 3 показан график измеренного светового потока различных источников света при КН одного уровня. Из него видно, что при одних и тех же КН у различных источников света наблюдаются разные колебания светового потока. У более чувствительных к КН, по сравнению с лампами накаливания, источников света, таких как люминесцентные лампы, колебания светового потока значительно больше. Поэтому при одинаковых КН у люминесцентных ламп наблюдается больший, по сравнению с лампами накаливания, уровень фликера. И наоборот, при использовании компактных люминесцентных, индукционных и светодиодных ламп колебания светового потока будут меньше, по сравнению со случаем использования ламп накаливания. Следовательно, уровень фликера таких источников света будет меньшим. Однако известные в настоящее время аналитические методы и метод непосредственных измерений  $P_{st}$  данное положение не учитывают. В этой связи необходимо их совершенствование.

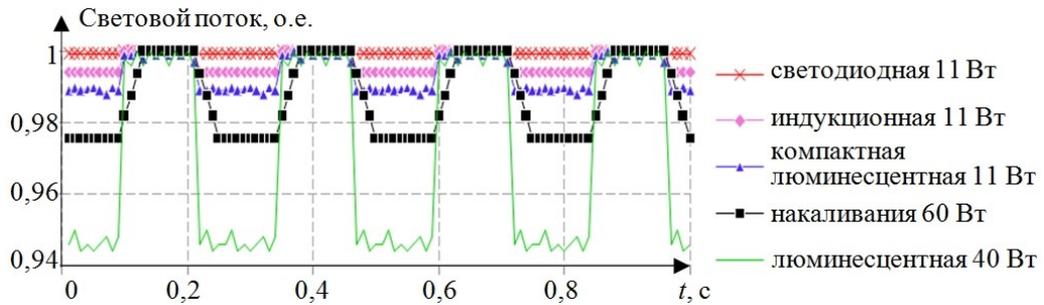


Рис. 3. График измеренного светового потока различных источников света при КН одного уровня

### Метод расчета НЧХП

Для совершенствования известных методов необходимо выполнять сопоставление изменений светового потока применяемых источников света с КН в электрической сети.

Повторяющиеся КН могут быть описаны с помощью амплитуды относительных изменений напряжения следующим выражением:

$$d = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100\% = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где  $\Delta U$  – изменения установившегося напряжения, В;  $U_{\max}$  и  $U_{\min}$  – наибольшее и наименьшее значения напряжения за период КН, В;  $U$  – действующее значение напряжения, В.

На рис. 4 показан график КН в электрической сети, по которому можно определить  $d$ .

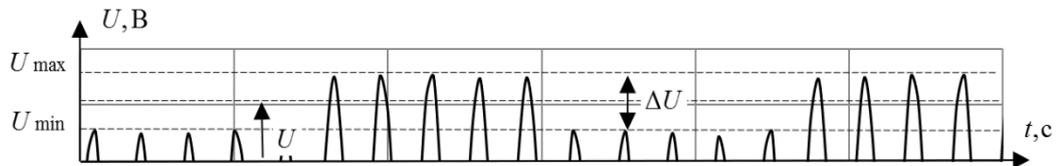


Рис. 4. График КН в электрической сети

Повторяющиеся изменения светового потока могут описываться с помощью коэффициента пульсации освещенности  $K_{п}$  по следующему выражению:

$$K_{п} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{2 \cdot E_{\text{ср}}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где  $E_{\max}$  и  $E_{\min}$  – наибольшее и наименьшее значения освещенности за период повторения колебаний светового потока, лк;  $E_{\text{ср}}$  – среднее значение освещенности, лк.

На рис. 5 показан график колебаний светового потока лампы накаливания, по которому можно определить  $K_{\Pi}$ .

Аналитически связь колебаний светового потока источников освещения с КН может быть представлена выражением

$$K_{\Pi} = H(d, f_{\text{кн}}). \quad (7)$$

Выражение вида (7) использовано в методе расчета НЧХП.

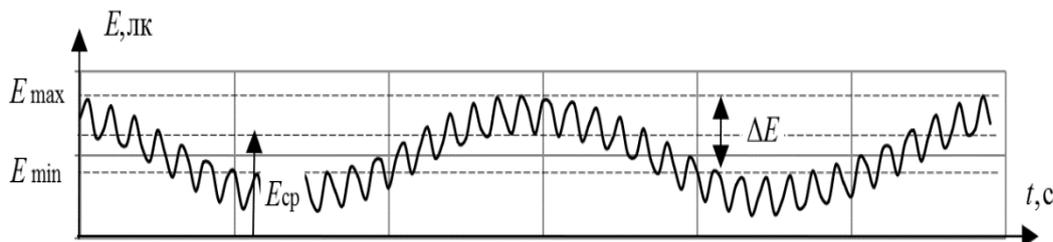


Рис.5. График колебаний светового потока лампы накаливания

Разработанный метод расчета НЧХП предполагает процедуры, выполняемые в следующем порядке.

1. Измерение параметров кривой допустимых колебаний светового потока.

Реализация этого пункта требует использования аппаратного обеспечения, позволяющего производить регистрацию изменений светового потока ламп при заданных параметрах питающего их напряжения.

У ламп накаливания мощностью 60 Вт с помощью аппаратного обеспечения при соответствующих стандартной НЧХП заданных параметрах КН проводится измерение значений  $K_{\Pi}$ .

2. Аналитическое описание функции связи колебаний светового потока лампы накаливания мощностью 60 Вт с КН в цепи её питания,  $K_{\Pi} = H_{\text{лн}}(d, f_{\text{кн}})$ .

Данные КН и соответствующих им колебаний светового потока ламп накаливания мощностью 60 Вт приводятся к виду (7) средством *Basic Fitting* прикладного пакета программ *MatLab*.

3. Определение допустимых КН при использовании источников света с разной чувствительностью к колебаниям напряжения.

С помощью специального аппаратного обеспечения путем подбора происходит определение уровня КН, при котором у исследуемого источника света возникают изменения светового потока, соответствующие кривой, представленной на рис. 6.

4. Аналитическое описание функции связи колебаний светового потока исследуемого источника света с КН в цепи его питания,  $K_{\Pi} = H_{\text{лн}}(d, f_{\text{кн}})$ . По аналогии с п. 2 данного метода используется *Basic Fitting* прикладного пакета программ *MatLab*.

5. Расчет параметров КН, при которых у лампы накаливания мощностью 60 Вт наблюдаются такие же колебания светового потока, что и у исследуемого источника света, амплитуд относительных изменений напряжения, эквивалентных колебаниям светового потока:

$$d_{\text{лн}}^{\text{ЭКВ}} = d \cdot \frac{H_{\text{л}}(d, f_{\text{кн}})}{H_{\text{лн}}(d, f_{\text{кн}})}. \quad (8)$$

6. Определение поправочного коэффициента  $p^{\text{л}}(f_{\text{кн}})$ .

Величины  $p^{\text{л}}(f_{\text{кн}})$  определяются по выражению

$$p^{\text{л}}(f_{\text{кн}}) = \frac{d_{\text{лн}}^{\text{ЭКВ}}(f_{\text{кн}})}{d(f_{\text{кн}})}. \quad (9)$$

7. Расчет параметров НЧХП для исследуемого источника света.

Параметры НЧХП для исследуемого источника света рассчитываются по следующему выражению:

$$d_{P_{st}=1}^{лн}(f_{кн}) = \frac{d_{P_{st}=1}^{лн}(f_{кн})}{p^{лн}(f_{кн})}, \quad (10)$$

где  $d_{P_{st}=1}^{лн}(f_{кн})$  – амплитуда относительных изменений напряжения, соответствующая стандартной НЧХП.

Параметры НЧХП при частотах КН, представленных в ГОСТ [1], могут быть измерены. Для этого с помощью аппаратного обеспечения и исследуемого источника света выполняется поиск значений  $d$ , соответствующих значениям  $K_{п}$  кривой допустимых колебаний светового потока.

Для оценки фликера во всем диапазоне частот его восприятия необходимо выполнение всех пунктов представленного метода.

**Совершенствование средств оценки фликера**

Для достоверной расчетной оценки фликера достаточно использовать поправочный коэффициент, полученный по выражению (9), и значение  $P_{st}$ , полученное известными расчетными методами:

$$P_{st}^{лн} = p^{лн}(f_{кн}) \cdot P_{st}. \quad (11)$$

В свою очередь, усовершенствование стандартной модели фликерметра может быть выполнено двумя способами:

- аналитическим описанием системы «лампа – глаз – мозг человека», соответствующей применяемым источникам света;
- введением блока поправки в структурную модель фликерметра.

Второй вариант удобнее, потому что его реализация предполагает выполнение простейших математических операций, например, с помощью недорогих микроконтроллеров.

При усовершенствовании стандартной модели фликерметра посредством введения в неё блока поправки должны использоваться НЧХП, рассчитанные по методике расчета НЧХП.

На рис. 6 показана структурная схема фликерметра, учитывающая чувствительность к КН применяемых источников света.

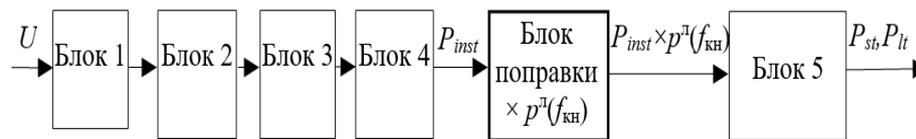


Рис. 6. Усовершенствованная модель фликерметра

В соответствии с чувствительностью к КН используемых источников света блоком поправки осуществляется умножение  $P_{inst}$  на поправочные коэффициенты, которые в реальном времени рассчитываются как

$$p^{лн}(f_{кн}) = \frac{d_{лн}(f_{кн})}{d_{лн}^{ст}(f_{кн})}, \quad (12)$$

где  $d_{лн}(f_{кн})$  – амплитуда относительных изменений напряжения НЧХП для применяемого источника света, %;  $d_{лн}^{ст}(f_{кн})$  – амплитуда относительных изменений напряжения стандартной НЧХП.

### Практическая реализация методики расчета НЧХП

Для реализации методики расчета НЧХП в Братском государственном университете был создан аппаратно-программный комплекс (АПК), позволяющий производить регистрацию изменений светового потока источников света при заданных параметрах КН в цепи их питания [17; 18].

Наглядно принцип работы АПК показан на рис. 7. Управляемый источник питания (блок 4) управляется сигналом с канала цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) платы ввода-вывода (блок 9), который, в свою очередь, связан с блоком, задающим параметры КН (блок 13). Величина светового потока исследуемой лампы анализируется фотоприёмником (блок 2), сигнал с которого усиливается в блоке 3. После этого усиленный сигнал поступает в аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) канала светового потока (блок 8). Одновременно сигнал с блока 4 проходит через входной преобразователь напряжения (блок 7) и поступает в АЦП канала напряжения сети (блок 10). Далее цифровые сигналы из каналов напряжения (блок 10) и светового потока (блок 8) поступают в блок 12 для записи.



Рис. 7. Блок-схема аппаратно-программного комплекса

В цепи, питающей исследуемую лампу (блок 1), имеется входной преобразователь тока (блок 5), сигнал с которого поступает в соответствующий канал АЦП платы ввода-вывода *PCI L-783M* (блок 11) для обеспечения функции защиты АПК от перегрузки.

В качестве исследуемых образцов были выбраны источники света, широко используемые в офисных, общественных и бытовых помещениях.

В ходе реализации методики получена кривая допустимых колебаний светового потока (рис. 8) и выполнено аналитическое описание функциональной связи колебаний светового потока с КН для исследуемых источников света (табл. 1).

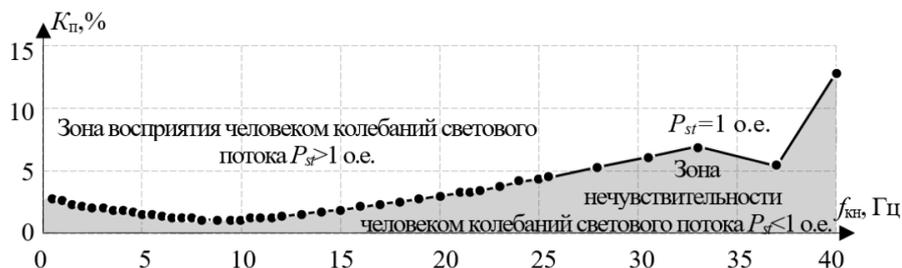


Рис. 8. Кривая допустимых колебаний светового потока

В ходе анализа результатов измерений, выполненных с помощью АПК, у ламп накаливания мощностью 60 Вт выявлена близкая к линейной зависимость между величинами  $K_n$  и  $d$ , а также между величинами  $K_n$  и  $f_{кн}$ . Поэтому функция связи вида (4) может быть представлена выражением

$$K_n = d \cdot (A + B \cdot f_{кн}), \quad (13)$$

где  $A$  – коэффициент полинома, о.е.;  $B$  – коэффициент полинома, Гц<sup>-1</sup>.

У источников света, имеющих отличный от ламп накаливания принцип действия, в процессе анализа результатов измерений, выполненных с помощью аппаратно-программного комплекса, зависимость между  $K_n$  и  $f_{кн}$  не выявлена. Также в ходе анализа выявлена зависимость между  $K_n$  и  $d$ . Поэтому функцию связи колебаний светового потока таких ламп с колебаниями напряжения в цепи их питания можно описать выражением следующего вида:

$$K_n = A \cdot d, \quad (14)$$

где  $A$  – коэффициент, о.е.

Для определения коэффициентов полинома в выражении (13) и коэффициента в выражении (14) использовалась линейная аппроксимация и применялся инструмент *Curve Fitting Tool* прикладного пакета *MatLab*.

В аналитическом виде функции зависимости колебаний светового потока ламп от колебаний напряжения в цепи их питания представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исследуемый источник света	$K_n = H(d, f_{кн})$
Накаливания 60 Вт	$(5,568 - 0,0016 \cdot f_{кн}) \cdot d$
Люминесцентная 40 Вт	$11 \cdot d$
Компактная люминесцентная 40 Вт	$2,022 \cdot d$
Индукционная 15 Вт	$1,134 \cdot d$
Светодиодная лампа 11 Вт	$0,1606 \cdot d$

Результатом предложенной методики являются рассчитанные НЧХП. Их графическая интерпретация показана на рис. 9.

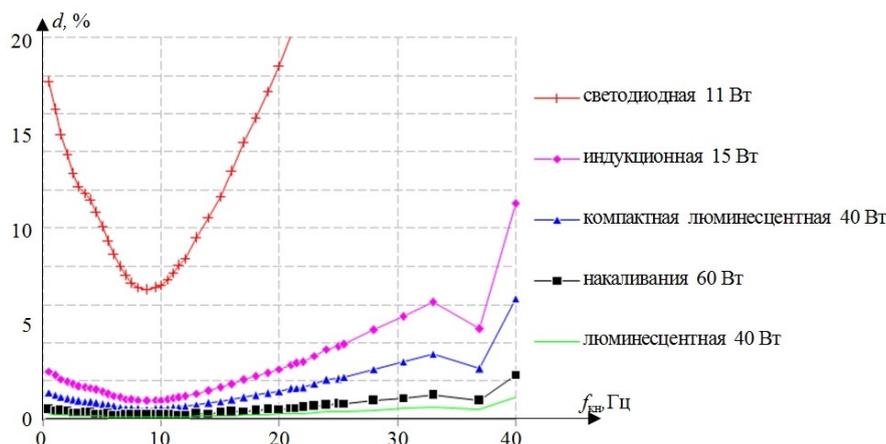


Рис. 9. Графическая интерпретация рассчитанных НЧХП

Из рис. 9 видно, что при одинаковых КН у люминесцентной лампы уровень фликера будет больше, чем у ламп накаливания. С другой стороны, оставшиеся источники света характеризуются меньшими уровнями фликера по сравнению с лампами накаливания.

В табл. 2. приведены наибольшие значения методической погрешности, возникающей при оценке фликера по известным в настоящее время методам, при использовании источников света с отличающейся от ламп накаливания мощностью 60 Вт чувствительностью к КН.

Величина методической погрешности определена по выражению

$$Err = \frac{P_{st}^{II} - P_{st}}{P_{st}^{II}} \cdot 100\% , \quad (15)$$

где  $P_{st}^{II}$  – фактическое значение кратковременной дозы фликера применяемых источников света, о.е.;  $P_{st}$  – кратковременная доза фликера, определенная стандартными методами, о.е.

Таблица 2

Методическая погрешность оценки фликера

Образец источника света	$P_{st}$ , о.е.	$P_{st}^{II}$ , о.е.	$Err$ , %
Светодиодная 11 Вт	1	0,0289	-3360
Индукционная 15 Вт		0,2042	-389,71
Компактная люминесцентная 40 Вт		0,3641	-174,65
Люминесцентная 40 Вт		1,9806	49,51

Из табл. 2 видно, что использование стандартных методов приводит к завышению результатов оценки фликера люминесцентных ламп мощностью 40 Вт почти в 2 раза, завышению результатов оценки фликера компактных люминесцентных ламп мощностью 40 Вт, индукционных ламп мощностью 15 Вт, светодиодных ламп мощностью 11 Вт – почти в 2, 4, и более чем в 30 раз, соответственно.

### Заключение

1. Обзор существующих методов оценки фликера показал их пригодность только в случае, когда для освещения используются лампы накаливания мощностью 60 Вт. При использовании источников света с отличающейся чувствительностью к КН такие методы дают недостоверные результаты оценки.

2. Совершенствование методов оценки фликера может выполняться путем сопоставления фактических изменений светового потока с КН в электрической сети. Реализация предложенной методики расчета НЧХП выполнена с использованием АПК.

3. Усовершенствование стандартной модели фликерметра осуществляется введением в её структурную модель блока поправки, который, в зависимости от чувствительности к КН применяемых источников света, корректирует значения мгновенной дозы фликера.

4. Кривая допустимых колебаний светового потока, полученная при реализации метода расчета НЧХП, должна использоваться при определении параметров НЧХП источников света с различной чувствительностью к КН в электрической сети.

5. Рассчитанные НЧХП являются частными случаями для исследуемых образцов источников света. Для достоверной оценки фликера других источников света необходима реализация метода расчета НЧХП.

6. Усовершенствованные методы и средства оценки фликера позволяют выполнять достоверную оценку фликера на этапах проектирования и эксплуатации электрических сетей.

### Литература

1. ГОСТ 51317.4.15–2012. (МЭК 61000.4.15:2010). Совместимость технических средств электромагнитная. Фликерметр. Функциональные и конструктивные требования. М.: Стандартинформ, 2014.

2. IEEE Std 1453–2015. IEEE Recommended Practice for the Analysis of Fluctuating Installations on Power Systems. NY.: IEEE. 2015.
3. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. М.: Энергоатомиздат, 2005. 261 с.
4. ГОСТ 32144–2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014.
5. Ташмаматов А.С., Нарынбаев А.Ф. Энергосберегающие лампы: плюсы и минусы // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2016. Т. 38. С. 136–141.
6. Сапрыка А.В., Черенков А.Д. Анализ работы современных энергосберегающих ламп // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2015. № 3 (134). С. 32–34.
7. Денисова Н.В., Шляпченко А.А. Исследование электрических параметров компактных люминесцентных ламп // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2011. № 5–6. С. 91–95.
8. ГОСТ 30804.3.3–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Ограничение изменений напряжения, колебаний напряжения и фликера в низковольтных системах электроснабжения общего назначения. Технические средства с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе), подключаемые к электрической сети при несоблюдении определенных условий подключения. Нормы и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2014.
9. IEEE Std 519–1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. NY.: IEEE. 1993.
10. IEEE Std 141–1969. IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants. NY.: IEEE. 1969.
11. ГОСТ 13109–97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: ИПК Изд-во стандартов. 1998.
12. ГОСТ Р 50397-2011 (МЭК 60050-161:1990). Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. М.: Стандартинформ. 2013.
13. Новоселов Н.А., Николаев А.А., Корнилов Г.П. Методика расчета кратковременной дозы фликера в сетях с дуговыми сталеплавильными печами // Промышленная энергетика. 2014. № 1. С. 27–31.
14. Калина Е.А., Черепанов В.В. Расчет колебаний напряжения электрической сети при работе асинхронных двигателей с резкопеременной нагрузкой // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 3 (32). С. 20–26.
15. IEC–868. Flicker meter. Functional and design specifications. 1986.
16. Лисицкий К.Е. Совершенствование метода оценки фликера // Системные исследования в энергетике. Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН. Вып.44. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2014. С. 50–55.
17. Аппаратный комплекс для определения передаточных функций искусственных источников света при оценке дозы фликера: пат. 119892 Рос. Федерация: МПК G 01 R 23/00/ Лисицкий К.Е., Струмеляк А.В.; заявитель и правообладатель Братск, ФГБОУ ВПО «БрГУ». № 2011149905; заявл. 07.12.11, опубл. 27.08.12, Бюл. № 24.
18. Лисицкий К.Е., Струмеляк А.В. Усовершенствование стандартной модели фликерметра для оценки дозы фликера в сетях общего назначения // Технологии ЭМС. 2014. № 1 (48). С. 11–16.

#### Автор публикации

*Лисицкий Константин Евгеньевич* – канд. тех. наук, старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Братского государственного университета. E-mail: lisitskiyke@gmail.com.

#### References

1. GOST 51317.4.15–2012. (MEK 61000.4.15:2010). Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Flikermetr. Funktsional'nye i konstruktivnye trebovaniya. M.: Standartinform, 2014.

2. IEEE Std 1453–2015. IEEE Recommended Practice for the Analysis of Fluctuating Installation on Power Systems. NY.: IEEE. 2015.
3. Zhezhel'enko I.V., Saenko Yu.L. Kachestvo elektroenergii na promyshlennykh predpriyatiyakh. M.: Energoatomizdat, 2005. 261 p.
4. GOST 32144–2013. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. M.: Standartinform, 2014.
5. Tashmamatov A.S., Narynbaev A.F. Energoberegayushchie lampy: plyusy i minusy. Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova. 2016. Vol. 38. P. 136–141.
6. Sapryka A.V., Cherenkov A.D. Analiz raboty sovremennykh energoberegayushchikh lamp. Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit. 2015. No. 3 (134). P. 32–34.
7. Denisova N.V., Shlyapchenkov A.A. Issledovanie elektricheskikh parametrov kompaktnykh lyuminescentnykh lamp // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. 2011. No. 5–6. P. 91–95.
8. GOST 30804.3.3–2013. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Ogranichenie izmeneniy napryazheniya, kolebaniy napryazheniya i flikera v nizkovol'tnykh sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. Tekhnicheskie sredstva s potrebyaemym tokom ne bolee 16 A (v odnoy faze), podklyuchaemye k elektricheskoy seti pri nesoblyudenii opredelennykh usloviy podklyucheniya. Normy i metody ispytaniy. M.: Standartinform, 2014.
9. IEEE Std 519–1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. NY.: IEEE. 1993.
10. IEEE Std 141–1969. IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants. NY.: IEEE. 1969.
11. GOST 13109–97. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. M.: IPK Izd-vo standartov. 1998.
12. GOST R 50397-2011 (MEK 60050-161:1990). Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Terminy i opredeleniya. M.: Standartinform. 2013.
13. Novoselov N.A., Nikolaev A.A., Kornilov G.P. Metodika rascheta kratkovremennoy dozy flikera v setyakh s dugovymi staleplavil'nymi pechami. Promyshlennaya energetika. 2014. No. 1. P. 27–31.
14. Kalina E.A., Cherepanov V.V. Raschet kolebaniy napryazheniya elektricheskoy seti pri rabote asinkhronnykh dvigateley s rezkoperemennoy nagruzkoj. Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy. 2016. No. 3 (32). P. 20–26.
15. IEC–868. Flickermeter. Functional and design specifications. 1986.
16. Lisitskiy K.E. Sovershenstvovanie metoda otsenki flikera. Sistemnye issledovaniya v energetike. Trudy molodykh uchenykh ISEM SO RAN. Vyp.44. Irkutsk: ISEM SO RAN, 2014. P. 50–55.
17. Apparatnyy kompleks dlya opredeleniya peredatochnykh funktsiy iskusstvennykh istochnikov sveta pri otsenke dozy flikera: pat. 119892 Ros. Federatsiya: MPK G 01 R 23/00. Lisitskiy K.E., Strumelyak A.V.; zayavitel' i pravoobladatel' Bratsk, FGBOU VPO "BrGU". No. 2011149905; zayavl. 07.12.11, opubl. 27.08.12, Byul. No. 24.
18. Lisitskiy K.E., Strumelyak A.V. Usovershenstvovanie standartnoy modeli flikermetra dlya otsenki dozy flikera v setyakh obshchego naznacheniya. Tekhnologii EMS. 2014. No. 1 (48). P. 11–16.

#### **Author of the publication**

**Lisitskiy Konstantin Evgenjevich** – Cand. of Engineering Sciences, senior lecturer of the department "Electricity and electrical engineering" of Bratsk state university". E-mail: lisitskiyke@gmail.com.

*Поступила в редакцию*

*24 ноября 2017 г.*

УДК 621.431.62-52

## ПРИМЕНЕНИЕ В СИСТЕМАХ АВТОПИЛОТИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТА АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЭМУЛЯЦИИ ДВИГАТЕЛЯ И ТРАНСИМИССИИ

М.Ф. Садыков, А.В. Голенищев-Кутузов, Н.К. Андреев

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

**Резюме:** На сегодняшний день ряд ведущих фирм работают над разработкой автопилотов. Авторы статьи предлагают дополнить систему автопилота системой контроля технического состояния автомобиля. Разработанный комплекс аппаратно-программного обеспечения позволяет работать с виртуальной математической моделью газового двигателя грузового автомобиля КамАЗ и может быть перенастроен под различные модификации газовых и дизельных двигателей. В то же время, с помощью этого комплекса есть возможность выявить скрытые дефекты системы управления и снизить трудоемкость процедуры калибровки. Аппаратное и программное обеспечение позволяют испытывать электронные блоки управления в стандартных и аварийных режимах работы датчиков и приводов, обеспечивая, тем самым, соответствие современным российским и международным требованиям к системам управления автомобилями.

**Ключевые слова:** аппаратно-программное обеспечение устройства, устройства для контроля технического состояния двигателя, состояния двигателя в составе системы автопилота.

**DOI:**10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-67-74

## HARDWARE AND SOFTWARE ENGINE EMULATION IN THE AUTOPILOT SYSTEMS

M.F. Sadykov, A.V. Golenishchev-Kutuzov, N.K. Andreev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

**Abstract.** Now a number of the leading firms work on creation of an automobile autopilot. The authors of the presented article offer to complement the system of an autopilot with the control system of the car technical condition. The developed hardware and software complex allows working with virtual mathematical model of the gas engine of the KamAZ truck and can be recustoized under different modifications of gas and diesel engines. At the same time by means of this complex there is an opportunity to reveal the latent defects of a control system and to reduce labor input of calibration procedures. The hardware and software allows testing electronic control units in standard and emergency operation modes of sensors and actuators, thereby providing compliance to the modern Russian and international requirements to control systems of cars.

**Keywords:** hardware and software devices, device to control technical condition of the engine, the condition of the engine as part of the autopilot system.

### **Введение**

На сегодняшний день ряд ведущих фирм работают над созданием автопилота для автомобиля. Предполагается, что такой автопилот должен быть оснащен набором специальных датчиков дистанционного действия, которые устанавливаются с каждой стороны перед и за автомобилем. Они контролируют все, что происходит в радиусе 4–5 метров от движущегося автомобиля. Кроме того, в его передней части установлены камера и радар. На борту имеется модуль *GPS*.

Информация с датчиков обрабатывается компьютерной системой, которая воссоздает общую картину, анализирует её и выдает сигналы на управление транспортными средствами. Современные системы управления способны к самообучению и вследствие этого постоянно самосовершенствуются [1]. Например, в 2014 году для всех новых автомобилей марки «Тесла» был разработан свой стандарт технологии автопилота. В октябре 2015 года было добавлено эфирное обновление программного обеспечения, что дало этим автомобилям возможность самостоятельно ориентироваться и парковаться на параллельной парковке. В режиме автопилота автомобилям по-прежнему требуется управление водителя, но автомобиль использует множество датчиков, в том числе направленный вперед радар, камеру с возможностью распознавания изображений и 360-градусный ультразвуковой датчик, чтобы ориентироваться на полосе движения и обнаружить другие транспортные средства [2].

Существует два основных способа тестирования программного обеспечения микроконтроллера. Первым, который используется на ранних этапах разработки программы, является симулятор. Симулятор – это программа, которая выполняется на компьютере общего назначения и имитирует набор инструкций микроконтроллера. Этот метод не позволяет тестировать устройства ввода-вывода. Наиболее полезным инструментом для тестирования и отладки является встроенный эмулятор. Эмулятор установлен в цепи вместо микроконтроллера и, в свою очередь, подключен к компьютеру общего назначения (ПК). Программа микроконтроллера может быть протестирована вместе с остальным оборудованием, с которым она будет работать. Персональный компьютер управляет системой и позволяет тестировать различные процедуры. На этапе разработки в программу могут быть легко внесены изменения.

Для решения подобных задач широко применяется комплекс *LABCAR*, который имеет высокую стоимость, особенно – программное обеспечение. Близость всех решений делает невозможным изменение аппаратного обеспечения под конкретный электронный блок. Указанный комплекс очень сложен в разработке и адаптирован под конкретные конфигурации электронного блока управления (ЭБУ) и двигателя внутреннего сгорания. Эмуляция нестандартного оборудования возможна только после обращения к специалистам фирм-разработчиков, а это очень дорого.

Авторы статьи предлагают калибровать и отлаживать систему автопилотирования аппаратно-программным комплексом, разработанным в Казанском государственном энергетическом университете совместно со специалистами завода «КамАЗ».

Описываемое устройство содержит электронные блоки и программы, имитирующие функции блоков и агрегатов автомобиля, включая также эмуляцию контролируемых датчиков, их сигналов и программ вождения. Наличие программ эмуляции позволяет проверить и протестировать работу электронных узлов и алгоритмы управления двигателем. Разработанное устройство предназначено для проведения предварительной настройки электронных таблиц, создающих характеристики силового двигателя, отработки реакций на возникающие неисправности и отклонения в работе системы управления, проверки алгоритмов этой системы. В то же время это позволяет системе выполнять самообучение и самосовершенствоваться в процессе накопления опыта.

Система эмуляции позволяет также эффективно проводить процесс калибровки, а значит при установке сложных систем избегать резкого увеличения затрат на калибровку.

Такие системы представляют собой набор стандартных инструментов для выполнения калибровки в автоматизированной среде. Разработанная система также может быть использована для проектирования ЭБУ.

Схема аппаратно-программного комплекса эмуляции работы ЭБУ и газового двигателя внутреннего сгорания (ГДВС) с контролем крутящего момента и адаптивным отключением цилиндров показана на рис. 1. Аппаратно-программный комплекс для эмуляции работы газового двигателя внутреннего сгорания состоит из персонального компьютера, устройства ввода/вывода и блока согласования электрических сигналов (рис. 2). Соответствующий блок используется для регулировки уровня сигнала ЭБУ с уровнем сигнала блока ввода/вывода, для защиты входных цепей блока ввода/вывода и для формирования дефектов устройств системы управления. Блок состоит из платы согласования приводов, платы согласования датчиков и платы координации запросов пользователя. Основная часть каналов ЭБУ подключается к входным/выходным платам через делители напряжения, обеспечивающие координацию уровней напряжения. Обеспечение требуемого значения внутреннего сопротивления датчика осуществляется путем установки соответствующей нагрузки в виде сопротивления.

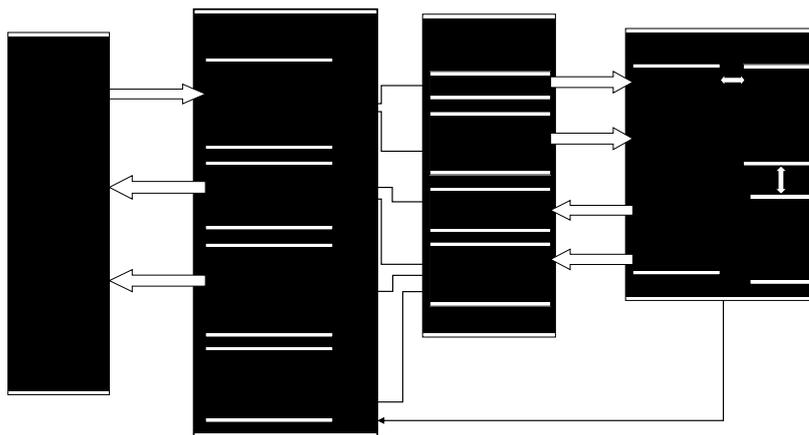


Рис. 1. Схема аппаратно-программной системы эмуляции работы ЭБУ и газового двигателя сгорания (ГСЭ) с контролем его крутящего момента и адаптивным выключением цилиндров



Рис.2. Внешний вид аппаратно-программного комплекса эмуляции работы ЭБУ и газового ДВС

## 2. Электронные элементы и программы, имитирующие функции блоков и сборок автомобилей

### 2.1. Разработка ЭБУ

В процессе разработки новых электронных блоков управления или модификаций существующих блоков возникает необходимость их проверки и тестирования правильности их алгоритмов управления. Можно выделить три этапа тестирования: *Mil*, *SIL* и *Hil* [3; 4].

Первый этап называется по стандарту *MIL* (модель в цикле), он состоит в создании опытного образца или модели устройства управления, которое должно быть разработано. Прототип ЭБУ смоделирован в программном обеспечении эмуляции. Чаще всего для этого применяются программные пакеты *NI LabVIEW* и *MATLAB Simulink*, в которых удобно управлять параметрами модели разработанного устройства. Это позволяет исключить ошибки на начальном этапе проектирования.

На втором этапе *SIL* (программное обеспечение в цикле) отлаженный алгоритм функционирования ЭБУ программируется как внешняя подключенная библиотека на алгоритмическом языке высокого уровня. Остальная виртуальная система моделируется с помощью пакетов *LabVIEW* и *Simulink*. На данном этапе отладка программируемого алгоритма осуществляется на языке C.

На третьем этапе *Hil* (аппаратное обеспечение в цикле) разработанный алгоритм зашивается в микроконтроллер. Это означает, что разработанное устройство реализуется в виде физически существующего пакета управления и проводится его проверка. Осуществляется тестирование взаимодействия ЭБУ с двигателем и другим оборудованием в режиме реального времени. Проводятся стендовые испытания на реальном двигателе внутреннего сгорания или на специальных эмуляторах, которые получили распространение в последнее время.

Проверка параметров, формируемых моделями аппаратно-программной системы и полученных на стендовых испытаниях реального двигателя, показала, что отклонение не превышает 5% (рис. 3.)

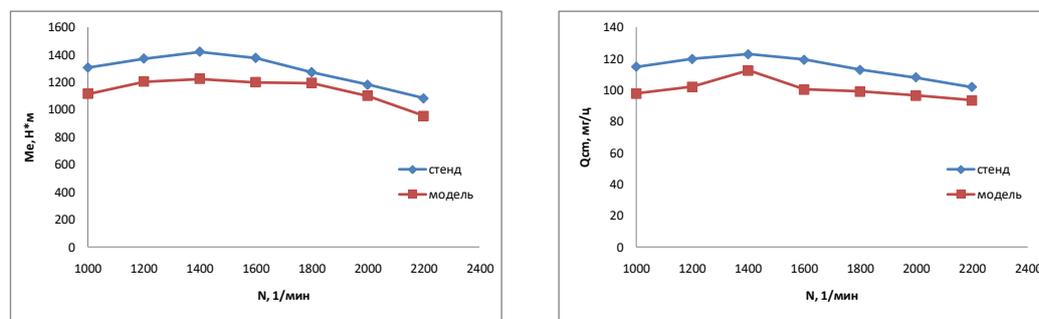


Рис. 3. Сравнение по параметрам крутящего момента и цикловой топливоподачи

Наряду с набором стандартных испытаний, следует ввести требования к современному ЭБУ согласно стандарту *ISO 26262*. Согласно ему, один ЭБУ должен обеспечить безопасную работу двигателя в условиях отказа важнейших датчиков и исполнительных механизмов. В существующей линейке средств разработки ЭБУ можно выделить программно-аппаратную эмуляцию работы двигателя внутреннего сгорания.

### 2.2. Элементы ЭБУ

Аппаратные модели выполняются в виде электронных устройств, имитирующих поведение двигателя грузовика в зависимости от входных значений ЭБУ и количества других параметров изменения настроек мощности, включая эмуляцию дефектов и параметров окружающей среды. Эмуляция производится, например, микропроцессорной

системой с параметрами конкретного двигателя для различных режимов поведения, обозначенных калибровочной картой с учетом влияния окружающей среды, функционирующей в режиме реального времени. Есть также комплексы, которые содержат в составе электродвигатель с переменным механическим моментом торможения.

Для временной шкалы одного рабочего цикла двигателя элементы блока ЭБУ можно подразделить на группы с быстро меняющимися параметрами и довольно медленно меняющимися параметрами.

Высокоскоростными элементами являются катушки зажигания, топливный дозатор, привод положения затвора дроссельной заслонки, датчик положения коленчатого вала, фазовый датчик, датчики давления и датчики температуры воздуха в коллекторе. Остальные устройства, такие как датчики давления и датчики температуры газа в цилиндре, положение педали газа и измеритель температуры охлаждающей жидкости, относятся к числу довольно медленных элементов управления.

Современный двигатель комплектуется набором датчиков и исполнительных механизмов, которыми управляет блок управления. Поэтому аппаратура комплекса должна содержать блок официального утверждения электрических сигналов и блок цифрового входа-выхода – АЦП/ЦАП. Программное обеспечение считывает и отправляет данные на платы АЦП, ЦАП и цифровые каналы. Аналоговые сигналы, полученные от реального блока управления через АЦП, преобразуются в цифровой код, который используется для дальнейшего применения в виртуальных моделях датчиков и приводов. Параметры, определенные в модели двигательного цикла, преобразуются виртуальными моделями датчиков в цифровые сигналы и передаются через ЦАП в реальном электронном блоке управления. Данные, не требующие преобразования в аналоговую форму, передаются непосредственно по цифровым каналам ввода/вывода.

В режиме работы двигателя датчики генерируют выходные сигналы для ЭБУ заданных уровней, которые не всегда поддерживаются платами ввода-вывода. Таким образом, схемы, предназначенные для эмуляции и согласования каждого датчика и привода, для сбора ЭБУ со сложной эмуляцией двигателя внутреннего сгорания должны обеспечивать параметры с учетом потребляемого тока, значения сопротивления и напряжения питания. Выходные контуры оснащаются релейными контактами для моделирования чрезвычайных ситуаций в виде обрыва или короткого замыкания в электрической цепи моделируемого устройства.

### 3. Внедрение устройства

Платформа *PXI* является основой аппаратного и программного обеспечения эмуляции работы двигателя. В шасси *PXI* установлен главный контроллер, обеспечивающий функционирование всех платформ и дополнительных модулей. *PXI* – платформа на базе персонального компьютера для автоматизации систем и измерений. *PXI* шасси объединяет *PCI* шины в модульном исполнении (компактный *PCI*). Основными преимуществами являются небольшая задержка и высокая пропускная способность до 132 Мбит/с при использовании связи через шину *PCI*. В аппаратном и программном обеспечении используется высокопроизводительный встроенный *Ni PXIe-835* контроллер, который базируется на процессоре *Intel Core i7-3610QE* для *PXI Express-System*. Вход аналоговой и цифровой информации в аппаратно-программную систему осуществляется с помощью высокоскоростной многофункциональной платы *NI-PXI-6251*, которая оптимизирована для точных измерений на высоких скоростях дискретизации. Поскольку входные и выходные порты контроллера интегрированы, все активные слоты шасси доступны для модулей измерений и управления. Такая конструкция контроллера минимизирует трудности интеграции и исключает необходимость дополнительных плат для большого количества соединительных связей.

Таким образом, шасси в формате *PXI* обеспечивает питание, охлаждение и производительность контроллера и модулей расширения через шины *PCI* и шину *PCI-Экспресс*. Выбранная конфигурация позволяет одновременно передавать большие объемы данных по входным/выходным каналам на контроллер оперативной памяти, а также выполнять запись и обработку полученных данных.

Рассмотрим некоторые примеры плат, выполняющих специальные функции.

Определение параметров системы впрыска топлива осуществляется с помощью платы с *NI* в формате *PXI-6602*. Плата содержит универсальный счетчик/таймер для измерения времени. В дополнение к функциям таймера, плата включает в себя *TTL-CMOS* цифровые порты ввода/вывода, которые могут быть легко отрегулированы для передачи и приема данных.

Точный контроль временных параметров системы зажигания реализован с использованием программируемых логических плат *NI* в формате *PXI-7952R*. Это плата высокой производительности, реконфигурируемая, программируемая с помощью программного обеспечения *LabVIEW* для ПЛИС. Архитектура программируемых логических интегральных схем (*FPGA*) оптимизирована для более быстрых и эффективных циклов выполнения в *LabVIEW FPGA* и позволяет выполнять несколько операций в одном цикле.

Цепи согласования сигналов датчиков и исполнительных устройств интегрированы в блок эмуляции и согласования, который устанавливается в *PXI*. Разработанный блок для согласования входных и выходных сигналов позволяет подключить аппаратную систему к стандартному разъему блока управления (ЭБУ), а также осуществляет эмуляцию дефектов в электрических цепях, датчиках и исполнительных механизмах.

Модель программируемого двигателя может быть построена на базе библиотек, содержащихся в программных комплексах в среде *Simulink*, *LabVIEW* и *GT-POWER*, *TESIS*, *DINAware*, *SimulationX*, *DIESEL-PK*, *STAR-CD*, *WAVE* или с помощью совместимых библиотек от разработчиков контрольно-измерительных приборов или автомобильных производителей. Соединенные блоки моделирования других частей транспортного средства и настройки мощности также являются частью инструментов разработки. Блок эмуляции двигателя осуществляется в виде программного комплекса на базе персонального компьютера, функционирующего в режиме реального времени. Схема виртуальной модели газового двигателя показана на рис. 4. Связь с ЭБУ осуществляется через платы расширения, подключаемые с помощью стандартных протоколов [5].

Одним из важнейших датчиков электронной системы управления двигателем является датчик положения коленчатого вала. Особенностью датчика является широкий диапазон вариаций амплитуды переменного напряжения на выводах. Минимальная амплитуда сигнала переменного напряжения на частоте вращения синхронизатора 20 Гц не менее 0,2 В. Максимальная амплитуда сигнала на частоте вращения синхронизатора 6000 Гц не превышает 250 В. Регулировка ЭБУ с помощью канала, который соединяет датчик положения коленчатого вала с блоком ввода/вывода осуществляется по схеме, выполненной на интегральном усилителе мощности *TDA230*. Выходная цепь снабжена релейными контактами, создающими имитацию аварийных ситуаций разрыва и короткого замыкания в электрической цепи датчика.

Описанный аппаратно-программный комплекс позволяет работать не только с виртуальной математической моделью газового двигателя КамАЗ, но и может быть перенастроен под различные модификации газовых и дизельных двигателей. С помощью этого комплекса можно обнаружить скрытые дефекты системы управления и программного обеспечения, а также значительно повысить точность управления и снизить трудоемкость калибровочных работ. Описанные устройства и программы могут быть использованы также для разработки и отладки новых автомобильных систем управления и контроля состояния.



Рис. 4. Блок-схема виртуальной модели газового двигателя

### Заключение

Разработанный аппаратно-программный комплекс позволяет работать с виртуальной математической моделью газового двигателя грузового автомобиля КамАЗ и может быть перенастроен под различные модификации газовых и дизельных двигателей. В то же время, с помощью этого комплекса есть возможность выявить скрытые дефекты системы управления и снизить трудоемкость процедуры калибровки. Аппаратное и программное обеспечение позволяет испытывать электронные блоки управления в стандартных и аварийных режимах работы датчиков и исполнительных механизмов, обеспечивая тем самым соответствие современным российским и международным требованиям к системам управления автомобилями.

### Литература

1. Golson, J., Bohn, Dieter (2016-10-19). «All new Tesla cars now have hardware for 'full self-driving capabilities'». The Verge. Retrieved 2016-10-22.
2. Fuehrer, Th., Hugel, R., Hartwich, F., Weiler, H.: «FlexRay – the communication system for future control systems in vehicles» SAE paper 2003-01-0110, Detroit, 2003.
3. K.E. Nisz, P.T. Oth, D.F. Oldor, T.K.Ulcsar, 2011. Vehicle dynamics based ABS ECU testing on a real time HIL simulator. Hungarian Journ. of Industrial Chemistry. Veszprem, 39(1): 57-62. University of Pannonia, Institute of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering. 8200 Veszprem, Eguyetem u. 10., Hungary.
4. Eckard Bringmann, Andreas Kramer, 2008. International Conference on Software Testing, Verification, and Validation. Model Based Testing of Automotive Systems, PikeTec GmbH, Germany.
5. Садыков М.Ф., Гараев В.М., Муратаев И.А., Ярославский Д.А., Гайнутдинов А.Р. Аппаратно-программный эмулятор ДВС с графическим программированием алгоритма // Вестник Казанского технологического университета. 2014. С. 293–294.

### Авторы публикации

**Садыков Марат Фердинантович** – канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: sadykov@kgeu.ru.

**Голенищев-Кутузов Александр Вадимович** – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Андреев Николай Кузьмич** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника» (ПМ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

### References

1. Golson, J., Bohn, Dieter (2016-10-19). “All new Tesla cars now have hardware for 'full self-driving capabilities'”. The Verge. Retrieved 2016-10-22.
2. Fuehrer, Th., Hugel, R., Hartwich, F., Weiler, H.: “FlexRay – the communication system for future control systems in vehicles” SAE paper 2003-01-0110, Detroit, 2003.
3. K.E. Nisz, P.T. Oth, D.F. Oldor, T.K.Ulcsar, 2011. Vehicle dynamics based ABS ECU testing on a real time HIL simulator. Hungarian Journ. of Industrial Chemistry. Veszprem, 39(1): 57-62. University of Pannonia, Institute of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering. 8200 Veszprem, Egyetem u. 10., Hungary.
4. Eckard Bringmann, Andreas Kramer, 2008. International Conference on Software Test-ing, Verification, and Validation. Model Based Testing of Automotive Systems, PikeTec GmbH, Germany.
5. Sadykov M.F., Garaev V.M., Murataev I.A., YAroslavskiy D.A., Gaynutdinov A.R. Apparato-programmnyy emulyator DVS s graficheskim programmirovaniem algoritma. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2014. P. 293–294.

### Authors of the publication

**Marat F. Sadykov** – Cand. of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of «Theoretical bases of electrical engineering» of Kazan State Power Engineering University (KSPEU). E-mail: sadykov@kgeu.ru.

**Alexandr V. Golenishchev-Kutuzov**– Dr. of Physico-Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of «Industrial Electronics and Lighting Engineering» of KSPU.

**Nikolay K. Andreev** – Dr. of technical Sciences, Professor at the Department of «Instrumentation and Automatic Electric Drive» of KSPU.

*Поступила в редакцию*

*26 февраля 2018 г.*

УДК 621.438:004.4

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ БАЛАНСИРОВКИ РОТОРА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS

И.Р. Тазеев, С.О. Гапоненко, А.Е. Кондратьев, А.Н. Замалиев

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия  
26\_ilnur94@mail.ru

**Резюме:** При изготовлении, эксплуатации и проведении ремонтных работ энергетического оборудования, включающего в себя ротор, возникает дисбаланс, связанный с неуравновешенностью масс самого ротора, что приводит к возникновению переменных нагрузок на опоры и изгиб ротора. Избежать отрицательного воздействия центробежных сил возможно путем динамической балансировки ротора на балансировочных станках. На современном производстве обычно применяются балансировочные станки, работающие в резонансном и зарезонансном режимах. Однако данные режимы балансировки имеют ряд существенных недостатков, которые можно решить применением дорезонансного метода. В частности, это возможность балансировки изделий с большими начальными дисбалансами и увеличение точности балансировки.

Учитывая высокие требования к надежности энергетического оборудования, применение зарезонансного метода балансировки необходимо дополнить другими способами. Для этого разработана и спроектирована модель дорезонансного балансировочного станка для балансировки роторов и вращающихся элементов энергетического оборудования. Для моделирования балансировочного станка и ротора использовалась система автоматизированного проектирования Autodesk Inventor.

На базе программной системы конечно-элементного анализа ANSYS проведен модальный анализ путем применения блочного метода Ланцоша. С целью выявления информативного диапазона частот, на котором следует выполнять дорезонансную балансировку ротора, рассчитаны собственные частоты колебаний 3D-моделей станины балансировочного станка и ротора ГТД-16М.

**Ключевые слова:** дорезонансный балансировочный станок, вибрация, собственные частоты колебаний, дисбаланс, ротор, частотный диапазон, САПР Autodesk Inventor, ANSYS.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-75-83

## MODELING OF THE MACHINE FOR THE BALANCING OF THE ROTOR IN THE ANSYS SOFTWARE COMPLEX

I.R. Tazeyev, S.O. Gaponenko, A.E. Kondratiev, A.N. Zamaliev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia  
www.26\_ilnur94@mail.ru

**Abstract:** An imbalance appears during the manufacture, operation and maintenance of power equipment. The rotor imbalance arises due to the unbalanced masses of the rotor which leads to the emergence of variable loads on the supports and bending of the rotor. The dynamic

*balancing of the rotor on the balancing machine is the way to avoid the negative effects of centrifugal forces. The balancing machines in resonant and soft-bearing modes are usually used on modern production. However, these methods of balancing has a number of shortcoming, which can be solved by using the hard-bearing method. For example, an ability of balancing of products with huge imbalance and increasing the accuracy of balancing.*

*Application of soft-bearing balancing method needs to be added in other ways, taking into account high requirments of the power equipment. A model of a hard-bearing balancing machine was designed for balancing rotors and rotating elements of power equipment. The Autodesk Inventor CAD software was used for modeling of the balancing machine and the rotor.*

*The modal analysis was conducted by using the block method of Lanczos on the basis of the ANSYS system. The main assumption during the modal analysis process was that the form of free fluctuations is calculated in relative units and does not allow to determine absolute shifts. The natural oscillation frequencies of the 3D models of the balancing machine bed and the rotor of the gas turbine engine 16M were calculated to determine the informative frequency range that the rotor should be hard-bearing balanced.*

**Keywords:** *hard-bearing balancing machine, vibration, natural oscillation frequencies, unbalance, rotor, frequency range, CAD Autodesk Inventor, ANSYS.*

## **Введение**

Современное теплоэнергетическое оборудование содержит большое количество вращающихся элементов и узлов. К ним можно отнести роторы турбин, электродвигателей, барабаны, а также крыльчатки вентиляторов и рабочие колеса центробежных насосов, вентиляторов и компрессоров. В процессе их производства и дальнейшего использования возникают неуравновешенные внутренние силы и дисбаланс.

Балансировкой роторов называется процесс, предназначенный для неуравновешенных вращающихся частей машины. Причиной появления нескомпенсированных центробежных сил и моментов является отклонение оси вращения ротора от главной центральной оси инерции. В этом случае при вращении возможно появление вибрации всего оборудования, что, в свою очередь, негативно влияет на срок службы подшипников, фундамента и опорных элементов [1].

Балансировка производится на балансировочных станках. Балансировочный станок – это измерительный прибор, определяющий место и степень статической или динамической неуравновешенности вращающихся деталей машин и оборудования.

Вибрацией называется механическое колебание тела либо целой механической системы. Возбудителями вибрации тела являются силы, приложенные к объекту извне или возникающие внутри него самого. Вибрация конкретного объекта полностью определяется силой возбуждения, ее направлением и частотой. Эти силы зависят от состояния машины, и знание их характеристик и законов взаимодействия позволяет диагностировать дефекты. Причинами возникновения дефектов могут служить неточности при проведении монтажа, наладки и ремонтных работ. Своевременное нахождение скрытых дефектов позволяет, в свою очередь, избежать дорогостоящих процессов останова и новых запусков оборудования [2].

Самыми распространенными датчиками для измерения вибраций являются пьезоэлектрические.

Пьезоэлектрические датчики предназначены для измерения механических параметров (усилий, давлений, ускорений, массы, угловых скоростей, моментов, деформаций и т.п.), построения тепловых приборов (термодатчиков, датчиков расхода, вакуума, измерителей электрических параметров, датчиков тепловых потоков), а также для контроля составов, концентраций газов, влажности и микромасс. По разрешающей

способности и точности эти устройства во многих случаях превосходят датчики, выполненные на других физических принципах [3].

Конструкции контрольно-измерительных пьезоэлектрических преобразователей, с одной стороны, определяются необходимыми электроакустическими параметрами, с другой – общими геометрическими, механическими, химическими и температурными требованиями, предъявляемыми к системе, в которой они используются. Естественно, во многих случаях эти требования противоречат друг другу, тогда приходится искать некоторое компромиссное конструктивное решение [4].

Для решения поставленной задачи необходимо перейти к методу Ланцоша (блочный), который предназначен для определения большого числа мод для больших моделей. Алгоритмической особенностью данного метода является назначение количества векторов Ланцоша, с помощью которых описывается математическая модель. Согласно теории метода Ланцоша существует минимальное число векторов, необходимое для точного описания динамического состояния рассматриваемой модели. Тем самым данный метод затрачивает меньше ресурсов (средние требования к оперативной и дисковой памяти) для проведения модального анализа.

Генерируемая на исследуемой геометрической модели конечно-элементная сетка служит для составления и решения системы уравнений в матричном виде. Сетка на объемных телах создается с помощью тетраэдрических твердотельных элементов с линейной функцией формы.

#### **Методы исследования**

Разработка установки для балансировки роторов (балансировочный станок).

Для упрощения построения балансировочного оборудования и для проведения дальнейших испытаний на нем была спроектирована 3D-модель балансировочного станка. Из большого количества существующих систем автоматизированного проектирования (САПР) был выбран программный продукт *Autodesk Inventor*. Основными преимуществами данной программы являются удобный интерфейс, совместимость 2D чертежей с 3D проектированием, а также предоставление компанией *Autodesk* студентам бесплатной образовательной лицензии.

В зависимости от режима работы и конструкции балансировочные станки бывают дорезонансного, резонансного и зарезонансного типа.

В работе рассматривается горизонтальный дорезонансный (с жесткими опорами) балансировочный станок.

К преимуществам балансировочных станков в дорезонансном исполнении можно отнести:

- жесткость конструкции, которая исключает возможность повреждения станка во время эксплуатации;
- износу подвергаются только опорные ролики и приводные ремни, которые легко заменимы;
- возможность балансировки изделий с большими начальными дисбалансами.

На рис. 1 показана 3D-модель дорезонансного балансировочного станка.

Дорезонансный балансировочный станок содержит станину 1 и два опорных узла 2, которые регулируются по высоте. Опорный узел включает основание опоры 3 и плиту опоры 4. Опоры могут смещаться относительно друг друга по рельсе, установленной на станине. Каждая опора оснащена пьезоэлектрическим датчиком силы.

Работа рассматриваемого станка контролируется блоком управления 5, к которому присоединяются датчики силы с каждой опоры и приводной электродвигатель. Электродвигатель, в свою очередь, ременной передачей с помощью ряда направляющих роликов приводит в движение балансируемый ротор 6. Имеющийся дисбаланс приводит к деформации чувствительных элементов, расположенных на основании опор.

Пьезоэлектрические датчики силы преобразовывают данные вибрации, соответственно, в электрический сигнал.

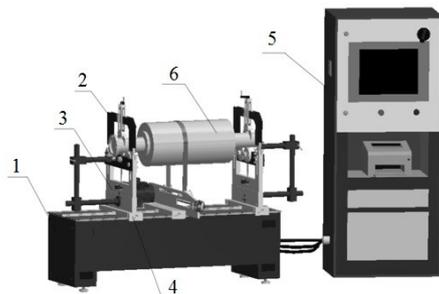


Рис. 1. 3D-модель балансировочного станка:  
1 - станина; 2 - опорный узел; 3 - основание опоры; 4 - плита опоры; 5 - блок управления;  
6 - исследуемый ротор

В качестве объекта балансировки рассмотрен ротор газотурбинного двигателя ГТД-16М. Ротор турбокомпрессора представляет собой вал, на одном конце которого находится диск турбины (рис. 2), на другом – крыльчатка компрессора (рис. 3). Ротор вращается на подшипниках качения, установленных в корпусе компрессора.



Рис. 2. Вал ротора турбокомпрессора с диском:  
1 - вал; 2 - диск с лопатками



Рис. 3. Крыльчатка компрессора

Дальнейшая работа заключалась в исследовании рассматриваемого ротора путем применения модального анализа в программном комплексе *ANSYS*. Модальный анализ является базисом любого динамического анализа, позволяя оценить динамическое

поведение объекта. Он служит для определения собственных частот и форм (мод) собственных колебаний.

В программном комплексе *ANSYS* существует несколько методов для проведения модального анализа: блочный метод Ланцоша, метод итераций в подпространстве, *Power Dynamics*, сокращенный. Наиболее подходящим методом для решения задачи является блочный метод Ланцоша.

Расчет собственных частот ротора ГТД-16М проводится в следующей последовательности.

1. Импортируется геометрия ротора в среду *ANSYSWB* из САПР *Autodesk Inventor* 2017 (рис. 4).

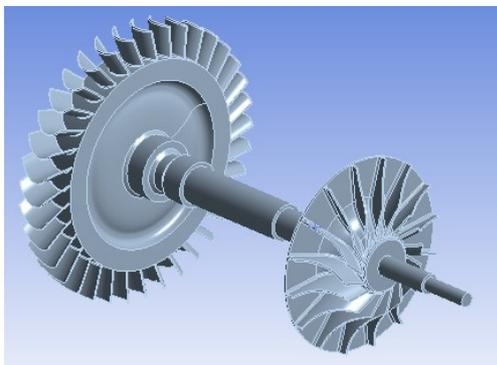


Рис. 4. Импортированная модель

2. Задаются свойства материалов: плотность –  $7850 \text{ kg/m}^3$ , модуль упругости –  $2e+11 \text{ N/m}^2$ , коэффициент Пуассона: 0,3.

3. Устанавливаются контактные условия: фиксированное крепление по боковым граням модели вдоль оси вращения ротора и цилиндрическое крепление в местах опоры вала ротора. В силу того, что модальный анализ является линейным, включением контактов в данный расчет можно пренебречь.

4. Создается сетка конечных элементов (рис. 5). Для этого выбирается: тип сетки – сетка на твердом теле, используемое разбиение – стандартная сетка, качество сетки – высокое, количество узлов – 44015, количество элементов – 23219.

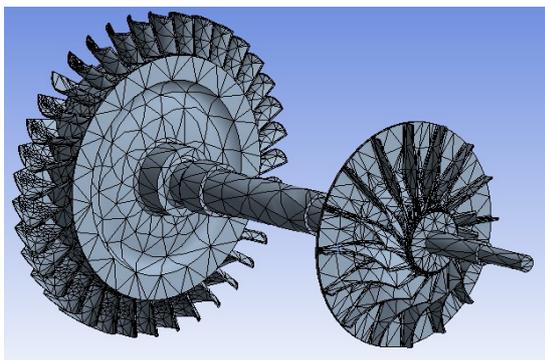


Рис. 5. Сетка конечных элементов на модели ротора ГТД-16М

В результате проведенного исследования определяются 24 первых мод колебаний рассчитываемого ротора. При анализе результатов модального расчета необходимо

учитывать, что форма свободных колебаний вычисляется в относительных единицах и не позволяет определить абсолютные смещения. Результаты сводятся в табл. 1.

Таблица 1

Моды колебаний исследуемого ротора					
Номер мод колебаний	Частота, Гц	Номер мод колебаний	Частота, Гц	Номер мод колебаний	Частота, Гц
1	269,67	9	1594,7	17	3190,8
2	394,52	10	1597	18	3227,2
3	395,1	11	1947,4	19	3550,9
4	428,13	12	2463,5	20	3564,6
5	703,52	13	2475,4	21	4022,3
6	704,88	14	2931,6	22	4147,5
7	1309,6	15	2936	23	4263,2
8	1313,1	16	3086,5	24	4267,8

Форма колебания первой моды балансируемого ротора при частоте 269,67 Гц показана на рис. 6.

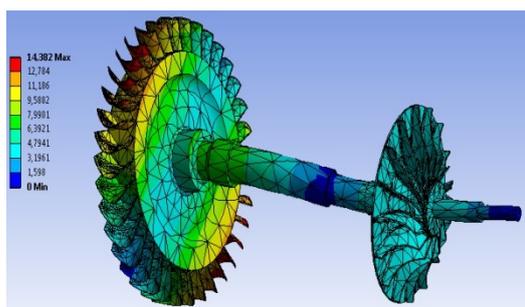


Рис. 6. Результаты выполненного модального анализа

Используя полученный диапазон частот собственных колебаний ротора, необходимо определить собственные частоты станины балансировочного станка, для того чтобы вычесть эти частоты из частотных мод исследуемого ротора.

#### Расчет собственных частот станины балансировочного станка

Для расчета собственных частот и мод собственных колебаний станины станка загружается модель станины в среду *ANSYSWB* (рис. 7).

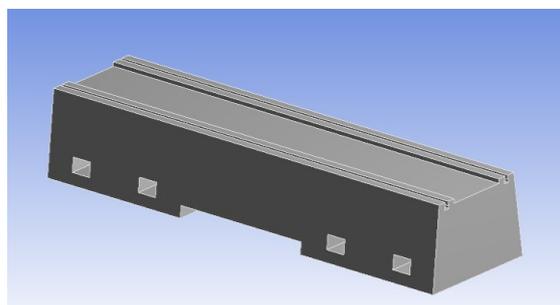


Рис. 7. Геометрическая модель станины в *ANSYSWB*

Станина изготавливается из полимерного гранита, который следующие свойства: плотность  $4680 \text{ kg/m}^3$ ; модуль упругости  $5,5e+10 \text{ N/m}^2$ ; коэффициент Пуассона 0,25.

При создании сетки конечных элементов (рис. 8) выбирается: тип сетки – сетка на твердом теле; используемое разбиение – стандартная сетка; качество сетки – высокое; количество узлов – 9817; количество элементов – 5471.

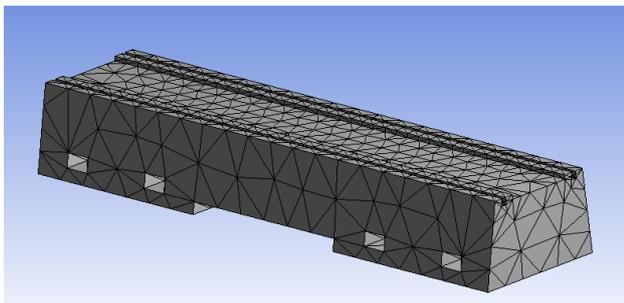


Рис. 8. Сетка конечных элементов на модели станины

В результате модального исследования станины определяется 24 первых мод колебаний. Результаты сводятся в табл. 2.

Таблица 2

Моды колебаний исследуемой станины балансировочного станка

Номер мод колебаний	Частота, Гц	Номер мод колебаний	Частота, Гц	Номер мод колебаний	Частота, Гц
1	1015,5	9	2288,1	17	3144,5
2	1083,4	10	2290	18	3229,8
3	1339,7	11	2404,2	19	3231,1
4	1419,6	12	2620,7	20	3311
5	1603,6	13	2678,3	21	3389,9
6	1769,2	14	3003,8	22	3432,5
7	1927,8	15	3030,6	23	3515,8
8	2019,5	16	3112	24	3567,8

Форма колебания первой моды станины станка при частоте 1015,5 Гц показана на рис. 9.

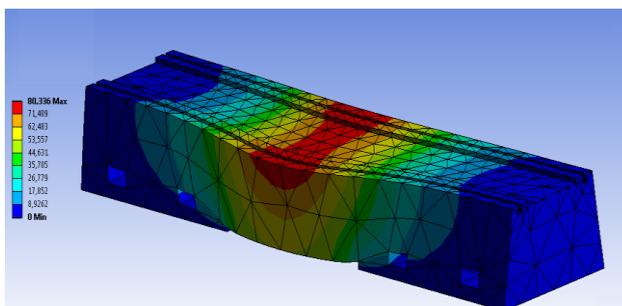


Рис. 9. Результаты выполненного модального анализа

### Результаты

В результате данного расчета определен диапазон собственных частот колебаний станины балансировочного станка. При сравнении табл. 1 и 2 видно, что частоты первых 6 мод собственных колебаний ротора лежат ниже собственных частот колебаний станины

станка. Это тот самый информативный частотный диапазон, на котором следует проводить дорезонансную балансировку ротора.

### **Обсуждение и выводы**

В результате проведенных модальных анализов ротора и станины балансировочного станка получен информативный диапазон частот, который позволяет проводить балансировку роторов в дорезонансном режиме работы. Балансировочный станок дорезонансного типа является более эффективным, потому что на данном станке проводится балансировка без калибровочных пусков, достигается высокая точность балансировки. Возможна балансировка любых типов роторов, соответствующих габаритным размерам станка.

### **Литература**

1. Тазеев И.Р. Особенности построения 3D-модели балансировочного оборудования // Материалы XII международной молодежной научной конференции по естественно-научным и техническим дисциплинам. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2017. Ч. 2. С. 192.
2. Gaponenko S.O., Kondratiev A.E. Device for Calibration of Piezoelectric Sensors // *Procedia Engineering*. Vol. 206. 2017. P. 146–150.
3. Основы измерения вибрации. Режим доступа: [http://www.vibration.ru/osn\\_vibracii.shtml](http://www.vibration.ru/osn_vibracii.shtml). Дата обращения 15.12.2017.
4. Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Костылева Е.Е., Загретдинов А.Р. Установка для калибровки пьезоэлектрических датчиков // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2016. № 7–8. С.79–86.
5. Пашков Е.Н. Определение времени автоматической балансировки ротора при установившейся скорости // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. Москва, 2013. № 4 (1). С. 476–482.
6. Математическое обоснование способа определения статической неуравновешенности роторов // *Вісник національного технічного університету «ХПІ»*. Харків, 2014. Вип. 31. С. 99–104.
7. Qin R. et al. Study on the Frequency Compensation of the Dynamic Unbalance Signal Extraction for General Hard Bearing Dynamic Balancing Machine. *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications, 2017. Vol. 870. P. 173–178.
8. Diouf P., Herbert W. Understanding rotor balance for electric motors // *Pulp and Paper Industry Technical Conference, Conference Record of 2014 Annual*. IEEE, 2014. P. 7–17.
9. Зиякаев Г.Р., Пашков Е.Н., Урниш В.В. Влияние трения на точность автоматической балансировки роторов // *В мире научных открытий*. Красноярск, 2013. № 10.1 (46). С. 104–117.
10. Дорошев Ю.С., Нестругин С.В. Практическая балансировка роторов электрических машин в собственных опорах // *Электробезопасность*. 2016. №. 4. С. 3–8.

### **Авторы публикации**

**Тазеев Ильнур Ренатович** – магистр кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Гапоненко Сергей Олегович** – ст. преподаватель кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Кондратьев Александр Евгеньевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

*Замалиев Адель Наилевич* – магистр кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

#### References

1. Tazeev I.R. Osobnosti postroeniya 3D-modeli balansirovochnogo oborudovaniya // Materialy XII mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii po estestvenno – nauchnym i tekhnicheskim distsiplinam. Yoshkar-Ola: Povolzhskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii universitet, 2017. Ch. 2. P. 192.
2. Gaponenko S.O., Kondratiev A.E. Device for Calibration of Piezoelectric Sensors // Procedia Engineering. Vol. 206. 2017. P. 146–150.
3. Osnovy izmereniya vibratsii. Rezhim dostupa: [http://www.vibration.ru/osn\\_vibracii.shtml](http://www.vibration.ru/osn_vibracii.shtml). Data obrascheniya 15.12.2017.
4. Gaponenko S.O., Kondrat'ev A.E., Kostyleva E.E., Zagretdinov A.R. Ustanovka dlya kalibrovki p'ezoelektricheskikh datchikov. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. 2016. No. 7–8. P.79–86.
5. Pashkov E.N. Opredelenie vremeni avtomaticheskoy balansirovki rotora pri ustanovivsheysya skorosti // Gornyy informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal). Moskva, 2013. No. 4 (1). P. 476–482.
6. Matematicheskoe obosnovanie sposoba opredeleniya staticheskoy neuravnoveshennosti rotorov // Visnik natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KHPI». Khar'kov, 2014. Iss. 31. P. 99–104.
7. Qin R. et al. Study on the Frequency Compensation of the Dynamic Unbalance Signal Extraction for General Hard Bearing Dynamic Balancing Machine. Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, 2017. Vol. 870. P. 173–178.
8. Diouf P., Herbert W. Understanding rotor balance for electric motors //Pulp and Paper Industry Technical Conference, Conference Record of 2014 Annual. IEEE, 2014. P. 7–17.
9. Ziyakaev G.R., Pashkov E.N., Urnish V.V. Vliyanie treniya na tochnost' avtomaticheskoy balansirovki rotorov // V mire nauchnykh otkrytiy. Krasnoyarsk, 2013. No. 10.1 (46). P. 104–117.
10. Doroshev Yu.S., Nestrugin S.V. Prakticheskaya balansirovka rotorov elektricheskikh mashin v sobstvennykh oporakh // Elektrobezopasnost'. 2016. No. 4. P. 3–8.

#### Authors of the publication

*Ilnur R. Tazeyev* –student of department “Industrial Heat Power Engineering and system of heating supply” (IHPE) Kazan state power engineering university (KSPEU). Phone: 8 (917) 8619983. E-mail: [www.26\\_ilnur94@mail.ru](mailto:www.26_ilnur94@mail.ru).

*Sergei O. Gaponenko*– Assoc. Prof. of department “Industrial Heat Power Engineering and system of heating supply” (IHPE) Kazan state power engineering university (KSPEU).

*Aleksandr E. Kondratiev* – Cand. Sci. (Techn.), Assoc. Prof. of department “Industrial Heat Power Engineering and system of heating supply” (IHPE) Kazan state power engineering university (KSPEU).

*Adel N. Zamaliev* – student of department “Industrial Heat Power Engineering and system of heating supply” (IHPE) Kazan state power engineering university (KSPEU).

*Поступила в редакцию*

*12 февраля 2018 г.*

УДК 534.21

## РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ШУМОВОГО ПОЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

О.А. Горбунова, Г.И. Павлов

Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия

**Резюме:** В статье рассмотрены вопросы прогнозирования шумового загрязнения от энергетического оборудования ТЭС, промышленных котельных и т.д. С помощью программного обеспечения АРМ «Акустика» и на основе измеренных данных смоделирована акустическая модель района, подверженного шумовому воздействию энергетического оборудования. Показано практическое применение экспериментально-теоретической модели шумового поля для оценки эффективности принимаемых технических решений по снижению шума.

**Ключевые слова:** шумовое загрязнение, акустический расчет, моделирование шумового поля.

**DOI:** 10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-84-92

## DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENTAL-THEORETICAL MODEL FOR THE NOISE FIELD OF THERMAL POWER PLANT EQUIPMENT

O.A. Gorbunova, G.I. Pavlov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,  
Kazan, Russia

**Abstract:** This article studies problems of forecasting of noise pollution by thermal power plant equipment, industrial boilers, etc. An acoustic model of a residential area, exposed to power plant equipment noise nuisance, has been developed by means of AWM “Acoustics” software using obtained data. Practical application of the experimental-theoretical model for the noise field was demonstrated for efficiency estimation of the proposed engineering solution to noise reduction.

**Keywords:** noise pollution, acoustic computation, noise field modeling.

Исследования, посвященные шумовому загрязнению окружающей среды, являются актуальной задачей. Наиболее острой проблема шума является в мегаполисах: шум городского транспорта, шумовое загрязнение строительного оборудования, круглосуточный режим работы энергетического оборудования и т.д.

В настоящее время в России основными нормативными документами, регламентирующими шумовую нагрузку на население и окружающую среду являются СН 2.2.4/2.1.8.562-96, СП 51.13330.2011, актуализированная редакция СНиП 23-03-2003, СанПиН 2.1.2.2645-10, ГОСТ Р 53187-2008, ГОСТ 31295.1-2005, ГОСТ 31295.2-2005, СП 23-103-2003, ГОСТ Р 54933-2012.

Строительство жилых домов часто проводится вблизи объектов теплоэнергетической отрасли. Это легко объяснимо – уменьшаются путевые потери тепла при его транспортировке

к потребителю. Однако плотность застройки жилых домов вблизи теплоэнергетических объектов оказывает негативное воздействие на окружающую среду. Одним из таких воздействий на население является шум. В данной статье обстоятельно рассмотрены вопросы прогнозирования шумового загрязнения от энергетического оборудования ТЭС, промышленных котельных и т.д. Основными источниками шума на этих объектах являются дымососы, насосы, газопроводы, газораспределительные станции и т.д.

Согласно санитарным требованиям, мониторинг шума от объектов энергетики проводится на территориях, непосредственно прилегающих к жилым домам, а также на площадках отдыха на территории микрорайонов. В этом случае измерения проводятся не менее чем в трех точках на ближайшей к источнику шума границе площадок [1].

Нормируемыми параметрами постоянного шума в расчетных точках являются уровни звукового давления  $L_p$ , дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000 и 8000 Гц. Для ориентировочных расчетов допускается использование уровней звука  $LA$ , дБА. Нормируемыми параметрами непостоянного шума являются эквивалентные (по энергии) уровни звука  $LA_{\text{экв}}$ , дБА, максимальные уровни звука  $LA_{\text{макс}}$ , дБА [2] и эквивалентные уровни звукового давления  $Lp_{\text{экв}}$ , дБ, в октавных полосах частот [3].

Измерения указанных величин проводят в дневное и вечернее время с 07.00 до 23.00 и ночью с 23.00 до 7.00 ч. Измерения проводятся в один из рабочих дней (при неизменных режимах работы энергетического предприятия в течение недели) и в один из выходных дней (в случае функционирования предприятия в выходные дни). При первичных наблюдениях измерения проводятся непрерывно в течение суток. При дискретных наблюдениях продолжительность измерения шума устанавливается в соответствии с рекомендациями ГОСТ 31296.2. Процесс измерения в этом случае проводится до стабилизации показаний прибора в пределах выбранной точности измерений [1].

Шумовыми характеристиками технологического и инженерного оборудования, создающего постоянный шум, являются уровни звуковой мощности  $L_w$ , дБ, в восьми октавных полосах частот, а оборудования, создающего непостоянный шум – эквивалентные уровни звуковой мощности  $L_{w_{\text{экв}}}$  и максимальные уровни звуковой мощности  $L_{w_{\text{макс}}}$  в восьми октавных полосах частот.

Шумовыми характеристиками источников внешнего шума для энергетических предприятий с максимальным линейным размером в плане до 300 м включительно являются эквивалентные уровни звуковой мощности  $L_{w_{\text{экв}}}$ , максимальные уровни звуковой мощности  $L_{w_{\text{макс}}}$  в восьми октавных полосах частот и фактор направленности излучения в направлении расчетной точки  $\Phi$  ( $\Phi=1$ , если фактор направленности неизвестен) [3].

Для составления карты шума плотность измерительных точек выбирается из условия, чтобы разность измеряемых величин в соседних точках не превышала 5 дБА (дБ). Высота микрофона выбирается по ГОСТ 31296.2 для одноэтажных зданий и площадок отдыха на высоте 1,2–1,5 м, в остальных случаях – 4 м. По средним за год (для котельных за отопительный период) значениям показателей шума в измерительных точках и их предельным величинам составляются оперативные шумовые карты. Для этого на планировочную подоснову территории наносятся все имеющиеся объекты инфраструктуры, жилые, промышленные здания и проводятся контуры уровней шума, выделяются зоны акустического дискомфорта.

Для построения таких экспериментальных (по результатам натуральных измерений) шумовых карт средних годовых уровней шума требуется практически неосуществимое большое количество долгосрочных измерений шума. А поскольку прогнозирование эффекта предлагаемых мероприятий по снижению шума выполняется только методами расчета, то при составлении шумовых карт на основе измерений трудно полноценно рассчитать эффект предлагаемых мероприятий. Поэтому расчеты показателей шума при составлении оперативных шумовых карт городских территорий целесообразно проводить

при помощи автоматизированных программ расчета, наиболее полно учитывающих географические особенности территории и позволяющих учесть максимально возможное число влияющих факторов [1].

Сегодня на рынке для проведения акустических расчетов внешнего шума представлен ряд различных программных продуктов. Основными программными комплексами являются:

- программа *SoundPLAN*, разработанная немецкой компанией *SoundPLAN GmbH*;
- программа “*Predictor*”, разработанная совместной голландско-немецкой фирмой “*SoftNoise*” [4];
- программа АРМ «Акустика», разработанная российской компанией ООО «ТЕХНОПРОЕКТ»;
- комплекс программ «Эколог-Шум», разработанных российской компанией «Интеграл»;
- программный комплекс «Гарант-шум», разработанный российской компанией ООО «НПО Фирма Гарант».

Вышеперечисленные программные средства позволяют проводить оценку шумового воздействия на территориях, прилегающих к промышленным предприятиям и транспортным магистралям, проектировать авто- и железные дороги, разрабатывать и определять эффективности шумозащитных мероприятий, определять санитарно-защитные зоны по фактору шума проектируемых и существующих предприятий, подготавливать документы соответствия предприятий законодательству и нормативам по шуму.

При решении поставленных задач авторы статьи использовали отечественный программный продукт АРМ «Акустика». Данная программа позволяет конструировать неравномерный рельеф местности с любой степенью детализации, городскую застройку произвольных форм, а также сложную дорожную сеть с многоуровневыми развязками, мостами, эстакадами и шумозащитными экранами. Ввод характеристик ограждающих конструкций и источников шума выполняется автоматизированно при помощи встроенного в программу каталога характеристик. Также предусмотрен ручной вариант ввода исходных данных.

В программе имеются возможности по назначению фактора направленности источника шума, принимаемого по справочным данным или натурным замерам. Программа позволяет прогнозировать эффективность работ по снижению акустического воздействия источников шума на нормируемые объекты на территории и в помещениях. Расчёты могут быть выведены в виде шумовых карт произвольной формы и шумовых разрезов для всех октавных частот, эквивалентного и максимального уровней звука [5; 6].

Моделирование акустической обстановки исследуемой территории включило в себя следующие этапы:

- сбор данных об источниках шума;
- составление модели местности (рельеф, жилые дома, здания и помещения котельной, стационарные внешние и внутренние источники шума котельной, ограждения);
- расчет уровней шума от точечных источников котельной;
- построение шумовой карты исследуемой территории;
- анализ результатов и разработка мероприятий по снижению шумовой нагрузки.

В качестве объекта исследования использовалось одно из теплоэнергетических предприятий г. Казани. Для данного предприятия характерным является то, что оно располагается в жилом массиве. Санитарно-защитная зона у объекта не организована, ближайшие жилые дома находятся в 10–15 метрах от границы предприятия. Постоянный шум, излучаемый энергетическим оборудованием, оказывает негативное влияние на жителей поселка. Проведенный на первом этапе анализ акустической обстановки в этом жилом массиве [7] показал значительное превышение санитарных норм СН 2.2.4/2.1.8.562-92 по шуму как в дневное, так и в ночное время. Опасность шумового воздействия котельной

обуславливается круглосуточным режимом работы ее энергетического оборудования. Требуемое снижение общего шума в жилой зоне должно составить до 30 дБА.

Выявление источников шума проводилось на основании регистрации акустических сигналов и изучения их спектров. Такие исследования были проведены на территории и внутри объекта. Установлено, что основными источниками шума являются: насосные агрегаты в цехе сетевой воды, редуктор газорегуляторного пункта, дутьевые и дымососные агрегаты дымососного цеха, наружная газовая труба, проходящая по внешнему фасаду котельной.

В качестве основы для построения карты шума использовалась цифровая модель местности – топооснова. На ней отражается следующая информация: отметки высот и контуры высот, функциональное назначение территории, функциональное назначение и высоты зданий, области затухания (наличие и параметры отражающих и экранирующих звук препятствий, лесные массивы и т.п.) [8].

Для разработки топоосновы территории энергетического предприятия и прилегающей к нему жилой зоны в программу АРМ «Акустика» были импортированы планы территории и информации об отметках высот в формате \*.dxf. Далее на модель рельефа были нанесены жилые здания селитебной зоны, территория и здание энергообъекта. Жилая застройка района исследования ограничивалась одно- и двухэтажными домами с приусадебными участками.

Внутри помещений предприятия были смоделированы основные источники шума. Шумовые характеристики этих источников определялись экспериментально.

Далее с использованием программного комплекса производились расчеты акустических параметров в жилом массиве, которые впоследствии накладывались на электронную топографическую основу. Для проверки достоверности расчетов назначались контрольные точки с известными акустическими параметрами.

Получено, что расчетный уровень шума в контрольных точках отличался не более чем на 2 дБА от практически измеренных величин. Отклонение результата расчета от измеренной величины на 2 дБ (А) считается допустимым для расстояний до 300 м от источника шума до точки измерений и на 3 дБ (А) – для расстояний свыше 300 м [8]. Это дало основание прийти к выводу об адекватности разработанной экспериментально-теоретической модели шумового поля, создаваемого энергетическим оборудованием объекта.

Акустическая обстановка исследуемого района, воспроизведенная с помощью специализированной программы АРМ «Акустика», в виде шумовой карты показана на рис. 1.

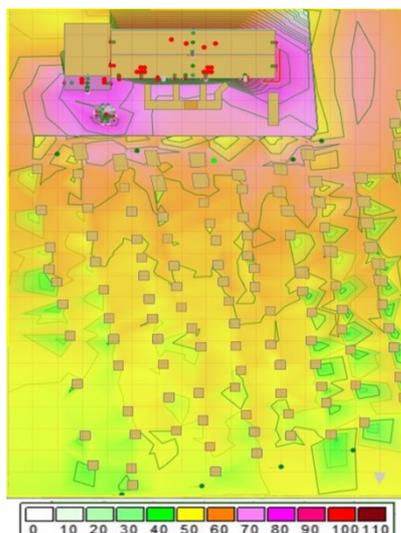


Рис. 1. Шумовая карта территории при работе всех источников шума

В таблице представлены расчетные уровни нормируемых показателей в контрольных точках.

Таблица

Расчетные уровни нормируемых показателей в контрольных точках

№ п/п	Контрольные точки измерения	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									$L_{экв}$ , Гц	$L_{max}$ , Гц
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	Силикатная, 24	67,7	66,5	60,6	57,5	64,8	55,8	50,4	43,5	32,6	63,2	63,2
2	Звениговская, 24	73,1	66,1	60,2	60,1	64,7	63,4	60,4	57,3	44,6	67,7	67,7
3	Измайловская, 29	72,7	68,3	57,8	56,9	53,9	55,1	56,0	47,4	32,8	60,6	60,6
4	Полянская, 2	70,7	66,9	56,8	56,6	57,8	58,8	56,4	48,0	32,2	62,5	62,5
5	Лениногорская, 24	68,2	59,3	52,7	55,2	55,2	53,3	46,7	38,3	22,3	57,0	57,0
6	Силикатная, 2	57,1	54,5	46,0	45,7	48,1	40,7	36,5	26,4	0,0	47,5	47,5
7	Звениговская, 2	59,5	53,2	45,7	47,4	48,3	43,6	39,6	30,2	0,0	48,9	48,9
8	Измайловская, 2	60,2	56,2	46,1	46,9	47,9	44,2	40,6	31,5	1,6	49,1	49,1
9	Полянская, 2	60,4	56,8	45,6	44,8	47,4	48,3	44,1	32,9	1,6	51,3	51,3

Шумовые карты удобны для анализа. Они включают в себя информацию о превышении допустимых уровней шума на территории, о распределении населения, подверженного повышенным уровням шума, о количестве жилых домов и других объектов, нормируемых по фактору шума, расположенных на территориях с повышенными уровнями шума.

Разработанную в АРМ «Акустика» экспериментально-теоретическую модель шумового поля объекта можно использовать для оценки эффективности принимаемых технических решений по снижению шума [9–12]. Например, на рис. 2 можно заметить изменение шумового поля при установке на пути распространения акустических волн шумозащитных экранов непосредственно в жилом массиве.

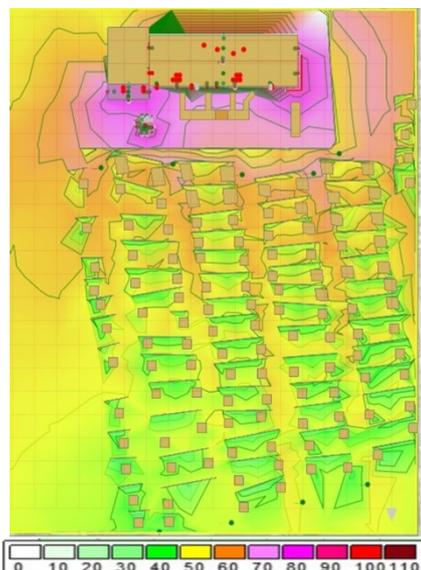


Рис. 2. Шумовая карта при установке акустических экранов на жилых участках

Из анализа карты шума видно, что установка индивидуальных акустических экранов на жилые участки недостаточна для достижения санитарных норм по шуму.

Другим вариантом снижения шума на пути распространения может являться установка акустического экрана вокруг объекта теплоэнергетики (рис. 3, а,б,в).

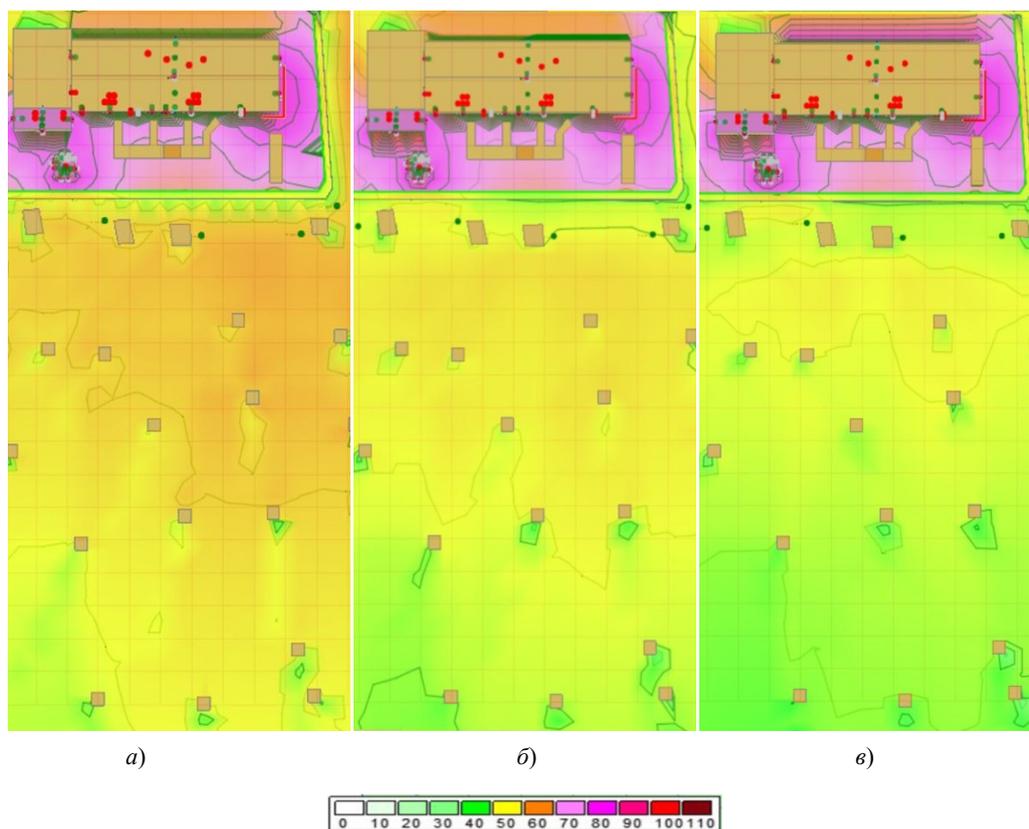


Рис. 3. Шумовая карта санитарно-защитной зоны при установке шумопоглощающего экрана толщиной 0,12 и высотой; а) 6 м; б) 9 м; в) 12 м

Из результатов расчетов видно, что такой вариант шумозащиты также не обеспечивает нормализацию акустической обстановки в жилой зоне.

На рис. 4 показана карта шума, рассчитанная для комбинированного технического решения [9]. Суть решения заключается в принятии мероприятий по снижению уровня звука в каждом основном источнике шума предприятия теплоэнергетики (на величину не менее 10 дБ) и на пути его распространения.

Акустические расчеты показали высокую эффективность комплексного подхода к снижению шума от работы энергетического оборудования предприятия теплоэнергетики.

Следует заметить, что использование современных программных средств позволяет в десятки раз уменьшить объем экспериментальных исследований, уменьшить трудо- и финансовые затраты, сократить временные интервалы реализации того или иного технического решения.

Предложенной методикой можно решить широкий спектр задач по шумовому загрязнению окружающей среды, который все чаще расширяется.



Рис. 4. Шумовая карта санитарно-защитной зоны при внедрении комплекса мероприятий по снижению шума

#### Литература

1. ГОСТ Р 53187-2008. Акустика. Шумовой мониторинг городских территорий.
2. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.
3. СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003.
4. Медведев В.Т., Тупов В.Б., Тараторин А.А., Тупов Б.В. Визуализация шумового загрязнения от ТЭС // Электрические станции. 2014. № 3.
5. Кузьмицкий А.В., Никифоров А.В., Иванов А.В. Оценка акустического воздействия на территории жилой застройки и в помещениях с помощью программного комплекса АРМ «Акустика» 3D // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2014. № 3.
6. Цукерников И.Е., Тихомиров Л.А. Сравнение результатов расчета автомобильного шума жилого района г. Москвы, полученных при использовании трех программных средств // Защита от повышенного шума и вибрации: сборник докладов IV Всерос. науч.-практич. конференции с международным участием. СПб., 2013.
7. Горбунова О.А., Павлов Г.И. Определение исходных данных для выполнения проектно-конструкторских решений по защите населения от шумового загрязнения // Защита от повышенного шума и вибрации: сборник докладов V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Под редакцией Н.И. Иванова. Санкт-Петербург, 2015. С. 365–372.
8. Буторина М.В. Карты шума оперативные для железнодорожного транспорта. Общие требования и методы построения // Защита от повышенного шума и вибрации: сборник докладов V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Под редакцией Н.И. Иванова. Санкт-Петербург, 2015. С. 106–114.
9. Горбунова О.А., Павлов Г.И., Накоряков П.В. Разработка проектно-конструкторских решений снижения шума от котельной для защиты населения // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21, № 10. С. 44–49.
10. Васинева М.В. Проектно-конструкторские решения для защиты населения от шума // Экология производства. 2014. № 8. С. 68–72.

11. Иголкин А.А. Разработка метода и средств снижения аэродинамического шума в пневматических и газотранспортных системах: дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.06. Самара, 2014.

12. Тупов Б.В. Разработка методов снижения шумового загрязнения окружающей среды газозвдушными трактами тягодутьевых машин ТЭС: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14. М.: 2015.

#### Авторы публикации

**Горбунова Оксана Анатольевна** – старший преподаватель кафедры «Промышленная и экологическая безопасность» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ.

**Павлов Григорий Иванович** – д-р техн. наук, профессор Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ.

#### References

1. State Standard 53187-2008 – Acoustics. Noise monitoring of urban areas. (in Russian).
2. Hygiene standards 2.2.4/2.1.8.562-96 – Noise in workplaces, in rooms of residential, public buildings and in the territory of the housing estate. (in Russian).
3. Set of rules 51.13330.2011 Protection against noise. (in Russian).
4. Medvedev V.T., Tupov V.B., Taratorin A.A., Tupov B.V. Visualization of noise pollution from thermal power plant. *Jelektricheskie stancii* [Power plants], 2014, iss. 3. (in Russian).
5. Kuz'mickij A.V., Nikiforov A.V., Ivanov A.V. Assessment of acoustic impact on territories of the residential area and in rooms by means of the Acoustics automated workplace program complex 3D. *Biosfernaja sovместimost': chelovek, region, tehnologii* [Biospheric compatibility: person, region, technologies], 2014, iss. 3. (in Russian).
6. Cukernikov I.E., Tihomirov L.A. Comparison of the results of calculation of road noise of the residential area of Moscow received when using three software. *Zashhita ot povыshennogo shuma i vibracii: Sbornik dokladov IV Vseros. nauch.-praktich. konferencii s mezhdunarodnym uchastiem.* [Protection against the increased noise and vibration. The collection of reports of the IV All-Russian scientific Definition of basic data for implementation of design decisions on protection of the population against noise pollution. and practical conference with the international participation.], St. Petersburg, 2013. (in Russian).
7. Gorbunova O. A., Pavlov G. I. Definition of basic data for implementation of design decisions on protection of the population against noise pollution. *Zashhita ot povыshennogo shuma i vibracii: Sbornik dokladov V Vseros. nauch.-praktich. konferencii s mezhdunarodnym uchastiem.* [Protection against the increased noise and vibration. The collection of reports of the V All-Russian scientific Definition of basic data for implementation of design decisions on protection of the population against noise pollution. and practical conference with the international participation.], St. Petersburg, 2015, pp. 365–372. (in Russian).
8. Butorina M. V. Operational noise maps for railway transport. General requirements and construction methods. *Zashhita ot povыshennogo shuma i vibracii: Sbornik dokladov V Vseros. nauch.-praktich. konferencii s mezhdunarodnym uchastiem.* [Protection against the increased noise and vibration. The collection of reports of the V All-Russian scientific Definition of basic data for implementation of design decisions on protection of the population against noise pollution. and practical conference with the international participation.], St. Petersburg, 2015, pp. 106–114. (in Russian).
9. O.A.Gorbunova, G.I.Pavlov, P.V.Nakorjakov. Development of design and engineering solution to reduce noise from the boiler room to protect the residents. *Jekologija i promыshlennost' Rossii.* [Ecology and industry of Russia], Moscow, 2017, vol. 21, iss. 10, pp. 44-49. (in Russian). DOI: 10.18412/1816-0395-2017-10-44-49.
10. Vasineva M. V. Design and engineering solutions to protect residents from noise. *Jekologija proizvodstva.* [Production ecology], 2014, iss. 8, pp. 68–72.

11. Igolkin A.A. *Razrabotka metoda i sredstv snizhenija ajerodinamicheskogo shuma v pnevmaticheskikh i gazotransportnykh sistemah* Doct. Diss. [Development of a method and means for reducing aerodynamic noise in pneumatic and gas transmission systems. Doct. Diss.]. Samara, 2014.

12. Tupov B.V. *Razrabotka metodov snizhenija shumovogo zagrjaznenija okruzhajushhej sredy gazovozdushnymi traktami tjagodut'evyh mashin TJeS*. Ph.D. thesis. [Development of methods for reducing noise pollution of the environment by gas-air tracts of draft machines of thermal power plants. Ph.D. thesis.]. Moscow, 2015.

#### **Authors of the publication**

***Oxana A. Gorbunova*** – Senior teacher of the chair of industrial and ecological safety, Kazan national research technical university named after A.N.Tupolev – KAI.

***Grigory I. Pavlov*** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kazan national research technical university named after A.N.Tupolev – KAI.

***Поступила в редакцию***

***28 февраля 2018 г.***

**СПОСОБЫ И УСТАНОВКИ КОНТРОЛЯ ОПОР ИЗ ТРУБЧАТЫХ СТЕРЖНЕЙ,  
ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ  
НА НИХ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК**

**И.З. Гатиятов<sup>1</sup>, Л.С. Сабитов<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет

gatiyatov.iz@kgeu.ru

***Резюме:** В статье представлены способы и установки контроля опор трубчатых стержней, применяемых в энергетическом строительстве при воздействии на них статических и динамических нагрузок. Описаны методики испытания.*

***Ключевые слова:** опора, соединение трубчатых стержней, способ контроля методика испытания, натурные испытания.*

***DOI:**10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-93-101*

**METHODS AND SYSTEMS CONTROL THE SUPPORTS OF THE TUBULAR  
RODS USED IN THE ENERGY CONSTRUCTION WHEN EXPOSED TO STATIC AND  
DYNAMIC LOADS**

**I.Z. Gatiyatov<sup>1</sup>, L.S.Sabitov<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Kazan state power engineering University

<sup>2</sup>Kazan (Volga region) Federal University

gatiyatov.iz@kgeu.ru

***Abstract:** The article presents the methods and installations of control supports tubular rods used in power construction when exposed to static and dynamic loads. Test methods are described.*

***Keywords:** support, connection of tubular rods, control method test procedure, full-scale tests*

Электроэнергетический комплекс России является основой роста ее экономики. Для эффективного функционирования электроэнергетического комплекса необходимо дальнейшее развитие воздушных линий электропередач (ВЛ) 0,6–1150 кВ, общая протяженность которых составляет более 2400000 км.

Интенсивное развитие ВЛ за счет широкого внедрения новых опор из трубчатых стержней (включая многогранные опоры), модификации существующих опор с применением прогрессивных материалов, обеспечивающих их высокую надежность и прочность при минимальной металлоемкости, обуславливает необходимость проведения механических испытаний их конструкций.

Отмеченный вывод справедлив и для опор контактной сети городского электрического и железнодорожного транспорта, имеющих конструкцию, схожую с опорами ВЛ. При этом к опорам контактных сетей предъявляются повышенные требования по надежности, вследствие того, что из-за невозможности резервирования они непосредственно влияют на непрерывность процесса перевозки, а в случае разрушения – создают угрозу безопасности движения и жизни людей.

При внедрении новых типов опор возникает необходимость в определении их фактической несущей способности при приложении к ним испытательной нагрузки, соответствующей реальной. Однако из-за сложности и трудоемкости, в некоторых случаях при этих испытаниях моделирование нагрузок сводится в одну силу, приложенную к верхнему концу опоры, что снижает объективность и качество ее контроля.

К наиболее тяжелым авариям на ВЛ относятся гололедные аварии, вследствие которых возникают массовые обрывы проводов, каскадные разрушения опор анкерного участка ВЛ. На долю указанных аварий в РФ приходится 25% повреждений ВЛ, а их продолжительность составляет примерно 40% аварийных отключений. Одним из факторов, обуславливающих эти аварии, по нашему мнению, является недоучет динамических нагрузок при проектировании ВЛ.

Известные способы испытания опор создают продольные и поперечные статические нагрузки, приложенные к опоре. В реальных условиях эксплуатации значительная часть повреждений опор связана с воздействием на них динамических нагрузок, которые могут превосходить статические.

Для получения действительной работы опоры и точной аналитики испытаний необходимо в режиме реального времени смоделировать и приложить на всю конструкцию ветровые и гололедные нагрузки, вес от элементов контактной сети, дорожных и рекламных знаков и т.д.

Исследования, а также проведение механических сертификационных испытаний для унификации новых конструктивных решений опор и приемочных механических испытаний опытных образцов опор предприятиями-изготовителями, в зависимости от уровня их проведения, осуществляются на Полигонах испытания ответственных и уникальных опор ВЛ и башенных сооружений, относящихся к мировым испытательным центрам строительных металлоконструкций, или на испытательных установках, оснащенных системами силового возбуждения и измерения усилий, перемещений и деформаций. При обзоре существующих полигонов испытания учитывался опыт мировых производителей опор и исследовательских центров. Рассмотренные полигоны отличаются друг от друга по ряду технических показателей. Для сравнения были рассмотрены *AL-Batain Industries Tower Testing Station* (Саудовская Аравия) *Butibori Tower Testing Station* (Индия), *Niroo research institute Tower Testing Station* (Иран), Америки: *DAMP Electric Tower Testing Station* (Бразилия), *Bramental Tower Testing Station* (Бразилия, США), Европы: Испытательный полигон башенных сооружений ООО «ОРГРЭС» (Российская Федерация), *Tower Research And Testing Centre*, (Испания), *ABB Corporation Tower Testing Stations* (Германия, Италия), *CELPi Tower Testing Station* (Румыния).

Фото некоторых известных в мире полигонов с расположением испытываемых конструкций опор ВЛ показаны на рис. 1:



а) Полигон в Германии (г. Манхейм)



б) Полигон в Италии (г. Ливорно)



в) Полигон в России (г. Хотьково)



г) Полигон в США (штат Техас)

Рис. 1. Наиболее известные испытательные полигоны мира

Изученные методики моделирования статической нагрузки, действующей на опору, представляют ее в виде единственной равнодействующей поперечной силы, которая фактически не отражает в полной мере реальную картину действующих на опору нагрузок. В качестве альтернативных вариантов моделирования были рассмотрены варианты испытаний многогранных опор на Полигоне испытаний опор линий электропередачи и башенных сооружений Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (рис. 2) и в Университете Северной Каролины, США (рис. 3) [16; 17].

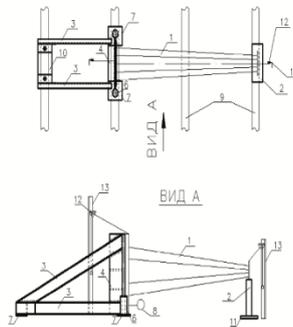


Рис. 2 Схема экспериментальной установки Донбасской национальной академии строительства и архитектуры

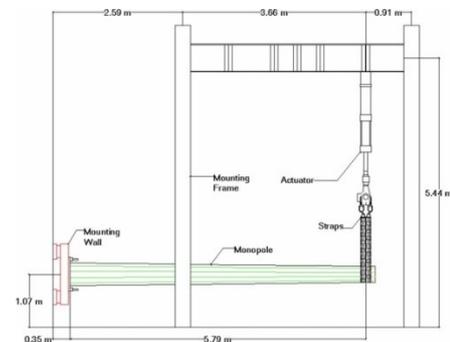


Рис. 3. Испытательный стенд, Университет Северной Каролины, США

Для учета воздействия всех прикладываемых нагрузок была предложена уникальная методика и изготовлена установка, которые позволяют наиболее точно смоделировать действующие статические нагрузки и обеспечивают простоту загрузений в процессе испытания [14; 15].

В ходе разработки методики испытаний по заказу завода изготовителя опор был спроектирован и изготовлен стенд для проведения испытаний ИС-1 (рис. 4).

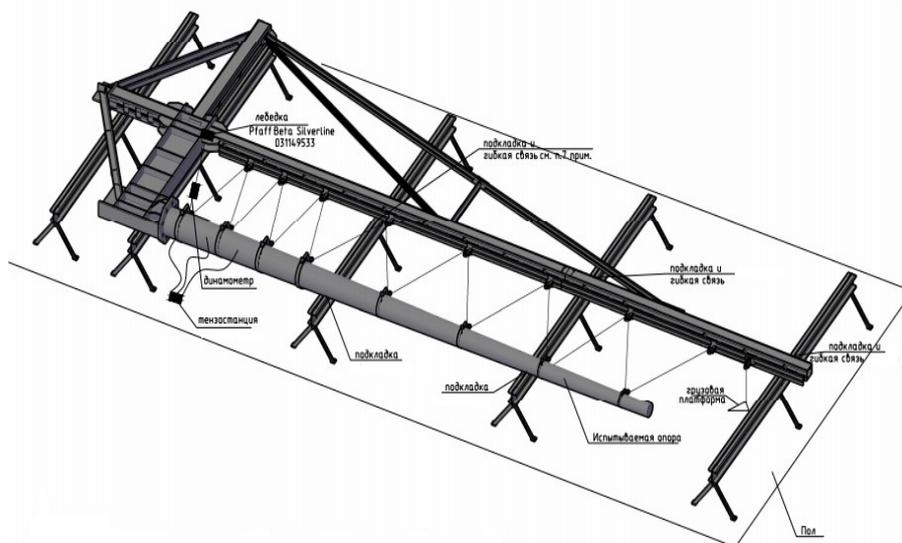


Рис. 4. Общий вид испытательного стенда ИС-1

Целью испытания опоры является определение ее фактической несущей способности и жесткости, а также определение соотношения этих параметров с результатами расчета [14; 15].

Методика была апробирована на многогранной опоре ОГК-7, с фланцевым соединением основания опоры с элементами фундамента. Исследование опоры ОГК-7 проводилось на испытательном полигоне ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». На рис. 5 показана установка тензодатчиков на опоре, на рис. 6 – испытания опоры на стенде ИС-1, на рис. 7 – характер разрушения опоры.



Рис. 5. Установка тензодатчиков на опоре



Рис. 6. Испытание опоры ОГК-7 на стенде ИС-1



Рис. 7. Опора ОГК-7 после испытания

Для получения данных о напряженно-деформированном состоянии при натурном испытании на стенде ИС-1 был использован автоматический электронный измеритель деформаций АИД-4. Нагрузки на опору прикладывались мерными грузами через грузовую площадку. Тензодатчики на опоре ОГК-7 7 высотой 7 м были установлены в пиках напряжений согласно изополям напряжений, полученным численно на программном комплексе *Autodesk Simulation*. Сравнение результатов экспериментальных и численных исследований представлено в таблице.

Таблица

Сравнение результатов испытания опоры ОГК-7

№ точки испытания	Напряжение по Мизесу $R_m$ (МПа), при результирующей нагрузке, $P_i$ МПа									
	Результаты моделирования на <i>Autodesk Simulation</i>					Результаты испытания на стенде ИС-1				
	50	100	150	200	250	50	100	150	200	250
1	75	113,6	152,1	190,8	229,4	72	100	148	182,3	225,4
2	10,7	16	21,2	26,6	31,9	10	14	18,9	25,6	29,9
3	7,1	10,3	13,6	16,9	20,9	7	9,8	13,01	15,4	18,1
4	115,7	174,7	233,7	287,7	351,7	103	165	220	274,3	349,5
5	75,2	112,4	149,7	187	224,3	72	111	139,6	187	220,8
6	3,2	4,1	4,9	5,7	6,6	3,3	3,8	5,01	5,8	6,8
7	120	179,1	238,3	297,4	356,5	105	165	220,5	280	338
8	21,1	31,3	41,5	51,8	62	20	29,7	38,2	48,8	58,9

Проведенные исследования показали, что предложенная методика испытания опор позволяет смоделировать действующие на опору нагрузки и обеспечить простоту ее загрузки в процессе испытания.

Результаты испытаний по предложенной методике на стенде ИС-1 показали хорошую сходимость теоретических значений напряжений и деформаций с экспериментальными. Значения указанных параметров отличались не более, чем на 7%. Как было отмечено ранее, наибольшее число нарушений в работе приходится на аварии вызванные гололёдообразованием. В результате налипания льда возникают массовые обрывы проводов, поломка опор ВЛ. По мнению авторов одним из факторов, обусловивших эти аварии, является недоучет динамических нагрузок при проектировании опор ВЛ, а также

проведение их испытаний в статических режимах, при том что нагрузки в динамических режимах могут превосходить статические почти в два раза.

На рис. 8 в качестве примера показано каскадное разрушение анкерного пролета ВЛ 330кВ на территории Крыма, произошедшее в зимний период 2009 г. В статье отмечено, что причинами, вызвавшими каскадное разрушение строительных конструкций, является превышение гололедноветровыми нагрузками расчетных значений, а также несовершенство конструкций опор.

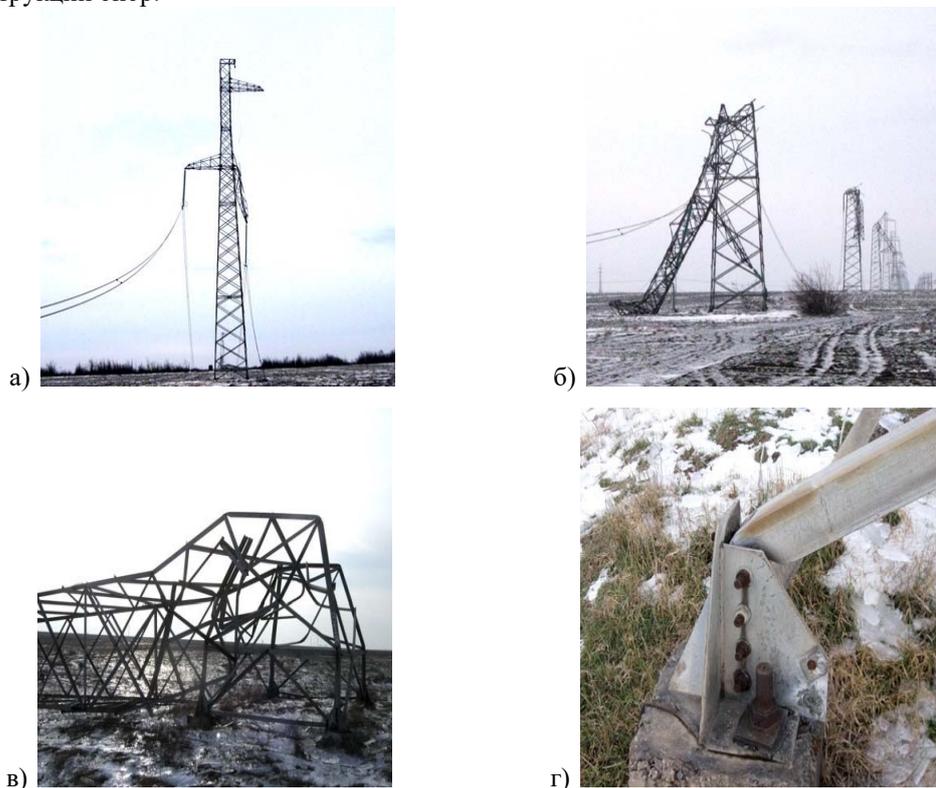


Рис. 8. Повреждения опор вследствие аварий на ВЛ 330 кВ:

- а) при обрыве гирлянды изоляторов верхней траверсы;
- б) каскадное разрушение опор в средней части ствола; в) излом поясов ствола опоры;
- г) в месте болтового соединения пояса с базой

Указанные обстоятельства вызвали необходимость разработки способа динамических испытаний опор ВЛ.

Способ относится к энергетическому строительству, а именно к способу динамических испытаний опор воздушных линий электропередачи, который позволяет определить влияние динамических нагрузок, связанных, например, с обрывом проводов вследствие гололедных аварий или усталостных колебательных повреждений на выходе из поддерживающего зажима, на прочность и деформативность опор.

Технический результат от применения нового способа заключается в обеспечении динамических испытаний единой системы опор, моделирующей реальный анкерный участок для определения их динамических характеристик. Способ испытаний основан на объединении опор упругими механическими связями, выполненными в виде тросовых тяг со встроенными пружинами растяжения. Представленная схема моделирования проводов позволяет определить динамические характеристике системы опор как в расчетных условиях, так и в аварийных режимах, вызванных воздействием гололедных нагрузок, превышающих предельные значения, включающих разрушение конструкций опор.

На рис. 9 показана схема стэнда для динамических испытаний опор воздушных линий электропередачи.

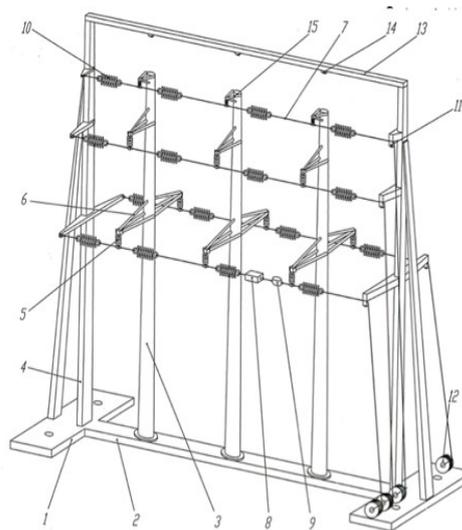


Рис. 9. Схема стэнда для динамических испытаний опор ВЛ

- 1 – силовая прямоугольная рама; 2 – основание силовой рамы; 3, 15 – испытуемые опоры;  
4 – боковые стойки; 5 – изоляторы; 6 – траверсы; 7 – тросовые тяги;  
8 – калиброванные вставки; 9 – динамометр; 10 – пружины растяжения; 11 – блоки;  
12 – лебедки; 13 – верхняя балка рамы; 14 – датчики перемещения

Разработанный способ основан на впервые предложенной концепции контроля опор ВЛ при их динамическом нагружении, которая заключается в проведении динамических испытаний единой системы опор, устанавливаемых в силовой раме компактной установки. Система опор моделирует анкерный участок ВЛ, опоры которого объединены упругими механическими связями, выполненными в виде тросовых тяг со встроенными в них пружинами растяжения, являющимися упругими эквивалентами проводов.

Предложенная концепция контроля опор ВЛ при их динамическом нагружении является предпосылкой общетеоретического подхода к изучению напряженно-деформированного состояния конструкций опор под воздействием динамических нагрузок, совершенствованию методик расчета новых конструкций опор и объективной оценки их соответствия требованиям надежности и долговечности.

#### Литература

1. Афанасьев А.С. Контактные сети трамвая и троллейбуса: Учебник для СПТУ. М.: Транспорт, 1988. 264 с.
2. Подольский В.И. Железобетонные опоры контактной сети. Конструкции, эксплуатация, диагностика. Труды ВНИИЖТ. М.: Интекст, 2007. 152 с.
3. Селедцов Э.П., Баранов Е.А. Эксплуатация опор контактной сети. М.: Транспорт, 1970. 96 с.
4. Кузнецов И.Л., Сабитов Л.С., Исаев А.В. Конструкции с соединениями стальных труб разного диаметра: монография для аспирантов и студентов, строительных и машиностроительных специальностей вузов. Казань: КГАСУ, 2012. 123 с.
5. Гатиятов И.З., Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л. Анализ результатов, полученных при механических испытаниях фрагментов опор электрического транспорта //Материалы 14-й международной научно-технической конференции «Эффективные строительные конструкции: теория и практика», г. Пенза, 2014. С. 42–45;
6. Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Гатиятов И.З. Экспериментальные исследования узлов соединения труб разного диаметра в опорах контактных сетей электротранспорта // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 6 (47). С. 90–95.
7. Патент №2288399 РФ. Узел соединения труб / И.Л. Кузнецов, А.В. Исаев, Л.С. Сабитов. Заявл. 07.04.2005; опубл. : 27.11.2006. Бюл. № 18. 2007.

8. Патент №2337268 РФ. Способ соединения труб разного диаметра / И.Л. Кузнецов, Л.С. Сабитов, А.В. Исаев. Л.С. Заявл. 28.03.2007; опубл. 27.10.2008. Бюл. № 30.
9. Гатиятов И.З., Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л. Определение напряженно-деформированного состояния опор контактных сетей городского электрического транспорта // Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии: сборник статей XVII Международной научно-практической конференции / МНИЦ ПГСХА. Пенза: РИО ПГСХА, 2015. С. 37–40.
10. Брудка Ян. Трубчатые стальные конструкции. Пер. с польского. М; 1975, 207 с.
11. СНиП П-23-81. Стальные конструкции. М.: ГУП ЦПП, 2001. 96 с.
12. Гатиятов И.З., Хамидуллин И.Н., Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л. Исследование напряженно-деформированного состояния опор контактных сетей электрического транспорта // Энергетика Татарстана. 2015. № 2 (38). С. 57–62.
13. Кузнецов И.Л., Гимранов Л.Р., Сабитов Л.С. Разработка конструкций стэнда и методики испытаний стальных многогранных опор. Казань: КГАСУ, 2013.
14. Пат. № 2554285 от 01.11.2013. Российская Федерация: МПК G01 M 5/00. Способ испытания опор / Л. Р. Гимранов, И. Л. Кузнецов, Л. С. Сабитов. Опубл. 27.06.2015. Бюл. № 18.
15. Гатиятов И.З., Хамидуллин И.Н., Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л. Методика и результаты испытаний опор на специальном стэнде ИС-1 // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 5 (52). С. 70–75.
16. Васильев В.Н., Гаранжа И.М. Методика экспериментальных исследований работы многогранных гнутых стоек (МГС) в опорной зоне опор воздушных линий (ВЛ) электропередачи // Журнал «Металлические конструкции». 2010. Т. 16, № 1. С. 51–60 .
17. Lanier, В.К. (2005), “Study in the Improvement in Strength and Stiffness Capacity of Steel Multi-sided Monopole Towers Utilizing Carbon Fiber Reinforced Polymers as a Retrofitting Mechanism,” M.S. Thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC.
18. Сабитов Л.С., Гатиятов И.З., Исханов Р.М., Патрушев Г.А., Кашапов Н.Ф. Способ динамических испытаний опор воздушных линий электропередачи // Материалы международной научно-практической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы. – 2017» Казань. В двух частях. Ч. 1. С. 139–141.

#### **Авторы публикации**

**Гатиятов Ильнур Зиннурович** – старший преподаватель кафедры «Электротехнические комплексы и системы» (ЭКС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Сабитов Линар Салихзанович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), доцент Казанского (Приволжского) федерального университета.

#### **References**

1. Afanas'yev A.S. Kontaktnyye seti tramvaya i trolleybusa: Uchebnyk dlya SPTU. M.: Transport, 1988. 264 p.
2. Podol'skiy V.I. Zhelezobetonnyye opory kontaktnoy seti. Konstruktsii, ekspluatatsiya, diagnostika. Trudy VNIIZHT. M.: Intekst, 2007. 152 p.
3. Seledtsov E.P., Baranov E.A. Ekspluatatsiya opor kontaktnoy seti. M.: Transport, 1970. 96 p.
4. Kuznetsov I.L., Sabitov L.S., Isayev A.V. Konstruktsii s soyedineniyami stal'nykh trub raznogo diametra: monografiya dlya aspirantov i studentov, stroitel'nykh i mashinostroitel'nykh spetsial'nostey vuzov. Kazan': KGASU, 2012. 123 p.
5. Gatiyatov I.Z., Sabitov L.S., Kuznetsov I.L. Analiz rezul'tatov, poluchennykh pri mekhanicheskikh ispytaniyakh fragmentov opor elektricheskogo transporta //Materialy 14-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Effektivnyye stroitel'nyye konstruktsii: teoriya i praktika», g. Penza, 2014. P. 42–45;
6. Sabitov L.S., Kuznetsov I.L., Gatiyatov I.Z. Eksperimental'nyye issledovaniya uzlov soyedineniya trub raznogo diametra v oporakh kontaktnykh setey elektrotransporta // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2014. No. 6 (47). P. 90–95.
7. Patent RF No. 2288399, RF. Uzel soyedineniya trub / I.L. Kuznetsov, A.V. Isayev, L.S. Sabitov. Zayavl. 07.04.2005; opubl. : 27.11.2006. Byul. No. 18. 2007.
8. Patent RF No. 2337268, RF. Sposob soyedineniya trub raznogo diametra / I.L. Kuznetsov, L.S. Sabitov, A.V. Isayev. L.S. Zayavl. 28.03.2007; opubl. 27.10.2008. Byul. No. 30.

9. Gatiyatov I.Z., Sabitov L.S., Kuznetsov I.L. Opredeleniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya opor kontaktnykh setey gorodskogo elektricheskogo transporta // Goroda Rossii: problemy stroitel'stva, inzhenernogo obespecheniya, blagoustroystva i ekologii: sbornik statey XVII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii / MNITS PGSKHA. Penza: RIO PGSKHA, 2015. P. 37–40.
10. Brudka YA. Trubchatyye stal'nyye konstruksii. Per. s pol'skogo. M; 1975, 207 p.
11. SNiP II-23-81. Stal'nyye konstruksii. M.: GUP TSPP, 2001. 96 p.
12. Gatiyatov I.Z., KHamidullin I.N., Sabitov L.S., Kuznetsov I.L. Issledovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya opor kontaktnykh setey elektricheskogo transporta // Energetika Tatarstana. 2015. No. 2 (38). P. 57–62.
13. Kuznetsov I.L., Gimranov L.R., Sabitov L.S. Razrabotka konstruksiy stenda i metodiki ispytaniy stal'nykh mnogogrannykh opor. Kazan': KGASU, 2013.
14. Pat. № 2554285 ot 01.11.2013. Rossiyskaya Federatsiya: MPK G01 M 5/00. Sposob ispytaniya opor / L. R. Gimranov, I. L. Kuznetsov, L. S. Sabitov. Opubl. 27.06.2015. Byul. No. 18.
15. Gatiyatov I.Z., KHamidullin I.N., Sabitov L.S., Kuznetsov I.L. Metodika i rezul'taty ispytaniy opor na spetsial'nom stende IS-1 // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2015. No. 5 (52). P. 70–75.
16. Vasylev V.N., Garanzha I.M. Metodika eksperimental'nykh issledovaniy raboty mnogogrannykh gnutykh stoyek (MGS) v opornoj zone opor vozdushnykh liniy (VL) elektroperedachi // ZHurnal «Metallicheskiye konstruksii». 2010. Vol. 16, No. 1. P. 51–60.
17. Lanier, B.K. (2005), "Study in the Improvement in Strength and Stiffness Capacity of Steel Multi-sided Monopole Towers Utilizing Carbon Fiber Reinforced Polymers as a Retrofitting Mechanism," M.S. Thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC
18. Sabitov L.S., Gatiyatov I.Z., Iskhanov R.M., Patrushev G.A., Kashapov N.F. Sposob dinamicheskikh ispytaniy opor vozdushnykh liniy elektroperedachi // Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Innovatsionnyye mashinostroitel'nyye tekhnologii, oborudovaniye i materialy. – 2017» Kazan'. V dvukh chastyakh. Ch. 1. P. 139–141.

#### **Authors of the publication**

***Ilnur Z. Gatiyatov*** – senior lecturer of the Department "Electrotechnical complexes and systems" FSBEI "Kazan state power emerging University".

***Linar S. Sabitov*** – PhD, associate Professor, associate Professor of the Department Of "energy supply of enterprises and energy saving technologies", KAZAN state energy University, associate Professor Kazan (Volga region) Federal University.

***Поступила в редакцию***

***04 мая 2018 г.***

# ФИЗИКА

УДК622.276.031:66.061.5

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙЭКСТРАКЦИОННОЙТЕХНОЛОГИИ ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ОКСИДА ЭТИЛЕНА

Д.Д. Ахметлатыпова, Ф.М. Гумеров, Э.Ш. Теляков

Казанский национальный исследовательский технологический университет,  
г. Казань, Россия  
daminija@mail.ru

**Резюме:** Цель. В статье рассмотрена модель сверхкритической  $CO_2$  – экстракционной технологии выделения оксида этилена из его водного раствора, которая предложена для замены энергозатратного процесса десорбции. Рассмотрена возможность использования нормальных алканов в качестве модификаторов основного экстрагента. Проведен сопоставительный анализ энергозатрат экстракционной и традиционной технологий. Методы. Для моделирования процессов использована программа Hysys.

Результаты. Осуществлено моделирование экстракционного процесса выделения оксида этилена из его водного раствора с использованием в качестве экстрагента чистого и модифицированного пропаном, н-бутаном и н-пентаном сверхкритического диоксида углерода, дополненного дальнейшей очисткой и концентрированием целевого продукта. Результаты указывают на нецелесообразность использования н-бутана и н-пентана в качестве добавки к диоксиду углерода. Сопоставление трех технологических схем (традиционной и двух экстракционных с чистым и модифицированным пропаном диоксидом углерода) показывает, что энергозатраты на обогрев колонн ректификации значительно более низкие в случае СК- $CO_2$  экстракционных технологий (традиционная технология 115 МВт, СК- $CO_2$  экстракционная технология без добавки и с добавлением пропана, соответственно, 36 и 79 МВт), тогда как совокупные мощности насосов и компрессоров наименьшие для традиционной технологии. Но поскольку степень извлечения оксида этилена в экстракционной схеме с добавлением пропана практически равна единице (0,996), рассмотренные энергетические показатели, отнесенные к килограмму получаемого продукта, оказались наилучшими именно для этой схемы.

**Ключевые слова:** водный раствор оксида этилена, сверхкритическая флюидная экстракция, сверхкритический диоксид углерода, энергосберегающие технологии.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-102-109

## EFFICIENCY OF THE USE OF SUPERCRITICAL EXTRACTION TECHNOLOGIE IN THE RECOVERY OF ETHYLENE OXIDE

D.D. Akhmetlatyypova, F.M. Gumerov, E.Sh. Telyakov

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia  
daminija@mail.ru

**Abstract:** The article considers a model of supercritical CO<sub>2</sub> – extraction technology of ethylene oxide emission from its aqueous solution, which is proposed to replace energy consuming desorption process. The possibility of using normal alkanes as modifiers of the main extractant is considered. A comparative analysis of the energy consumption of supercritical and traditional technologies is carried out.

**Methods.** The Hysys program was used to model the processes.

**Results.** Was simulated the extraction process of ethylene oxide separation from its aqueous solution using as an extractant pure and modified with propane, n-butane, n-pentane supercritical carbon dioxide supplemented with further purification and concentration of the desired product. The results indicate the inappropriateness of using n-butane and n-pentane as an additive to carbon dioxide. Comparison of three technological schemes (traditional and two extraction schemes with pure and modified carbon dioxide) shows that the energy consumption for heating the rectification columns is significantly lower in the case of SC-CO<sub>2</sub> extraction technologies (115 MW – traditional technology, 36 and 79 MW for SC – CO<sub>2</sub> extraction technology without additives and with the addition of propane, respectively), while the combined capacities of pumps and compressors were the least for traditional technology. But, since the degree of extraction of ethylene oxide in the extraction scheme with the addition of propane turned out to be practically equal to unity (0.996), the considered energy indices, referred to the kilogram of the product obtained, turned out to be the best for this scheme.

**Keywords:** aqueous solution of ethylene oxide, supercritical fluid extraction, supercritical carbon dioxide, energy-saving technologies.

### **Введение**

Оксид этилена – один из важнейших продуктов органического синтеза. На его основе получают большое количество продуктов химии: этаноламины, этиленгликоли и их производные. В промышленном масштабе оксид этилена получают путем окисления этилена кислородом в присутствии серебряного катализатора. Технология его выделения связана с водной абсорбцией продукта из реакционной смеси и последующей десорбцией, которая является одной из наиболее энергозатратных стадий процесса. Одним из способов снижения энергозатрат является применение сверхкритического флюидного CO<sub>2</sub> экстракционного процесса. Известно достаточно большое количество примеров успешного использования сверхкритического флюидного экстракционного процесса с экстрагентами различной химической природы (CO<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> и др.) для концентрирования водных растворов органических соединений. К примеру, применение данной технологии оказалось весьма эффективным при производстве изопропанола [1].

Целью настоящего исследования является разработка и моделирование новой энергоэффективной технологии выделения оксида этилена из его водного раствора, основанной на использовании сверхкритического флюидного CO<sub>2</sub> экстракционного процесса. Решается задача поиска возможных путей снижения энергозатрат, сопровождаемая сопоставительным анализом энергетической и экономической эффективности экстракционной и традиционной технологий.

### **Материалы и методы исследования**

В качестве сырья рассматривается водный раствор оксида этилена, состав которого одинаков для всех вариантов моделируемых схем. Состав сырья примерно соответствует составу раствора на выходе из абсорбера установки получения оксида этилена в ОАО «Нижекамскнефтехим» (содержание оксида этилена принято равным 1,8% масс.). Кроме оксида этилена и воды, насыщенный абсорбент содержит в небольших количествах такие примеси, как моноэтиленгликоль, ацетальдегид, уксусную кислоту, диоксид углерода.

Поскольку в данной работе рассматриваются крупнотоннажные производства, при моделировании расход сырья принят равным 1254659 кг/час (производственные данные).

Моделирование процессов проведено с использованием универсальной моделирующей программы *Husys*, которая, благодаря строгим моделям расчетов и большой базе данных по свойствам веществ, позволяет достаточно точно моделировать процессы разделения в области высоких давлений при условии применения пользовательских коэффициентов бинарного взаимодействия, определяемых эмпирически. Для определения коэффициентов бинарного взаимодействия рассмотрены экспериментальные данные по равновесию бинарных систем: диоксид углерода – оксид этилена, диоксид углерода – вода, диоксид углерода – моноэтиленгликоль, диоксид углерода – уксусная кислота, *n*-алканы – диоксид углерода, *n*-алканы – вода, заимствованные из разных источников. В качестве термодинамической модели использовано уравнение состояния Пенга-Робинсона:

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v(v+b)+b(v-b)}, \quad (1)$$

где  $P$  – давление системы, МПа;  $R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/(кг-моль К);  $T$  – температура системы: К;  $v$  – удельный объем, м<sup>3</sup>/кг-моль;  $a, b$  – коэффициенты, учитывающие межмолекулярное взаимодействие и конечный объем, соответственно.

В качестве правила смешивания использовано уравнение Ван-дер-Ваальса:

$$b = \sum y_i b_i \quad \text{и} \quad a = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n y_i y_j a_{ij}, \quad (2)$$

$$a_{ij} = \sqrt{a_i \cdot a_j} \cdot (1 - k_{ij}), \quad (3)$$

где  $k_{ij}$  – коэффициент, учитывающий бинарное взаимодействие  $i$ -го и  $j$ -го компонентов смеси;  $y$  – мольные доли компонентов.

При выделении оксида этилена из его водного раствора необходимо использовать экстрагент с невысокой критической температурой, поскольку при повышении температуры в результате взаимодействия оксида этилена и воды возрастает скорость образования моноэтиленгликоля. При этом сам экстрагент также не должен реагировать с компонентами смеси. Необходимо также учесть, что экстрагент, растворенный в обедненном сорбенте, может попадать в реакционный газ и влиять на работу реактора. Всем этим условиям соответствует диоксид углерода, критические параметры которого относительно невысоки ( $T_{кр} = 304,21 \text{ К}$ ,  $P_{кр} = 7,383 \text{ МПа}$ ). При этом он уже присутствует в сырье в виде примеси.

Ф.М. Гумеровым с соавторами экспериментально исследованы растворимость оксида этилена в сверхкритическом диоксиде углерода, а также процесс сверхкритической флюидной экстракции оксида этилена из его водного раствора [2]. Полученные результаты показывают высокую сорбционную активность сверхкритического диоксида углерода относительно оксида этилена, причем быстрый рост коэффициента фазового распределения наблюдается в диапазоне давлений 7–12 МПа. При выборе технологического режима работы экстракционного блока необходимо учитывать и влияние его параметров на распределение основных компонентов и примесей в продуктах разделения. Рост давления в смеси способствует повышению содержания оксида этилена во флюидной фазе, но в то же самое время рост давления приводит к увеличению стоимости массообменного оборудования и к повышению нагрузки на насосы.

Выбранные значения давления и температуры должны обеспечивать наименьшую растворимость таких примесей, как ацетальдегид, уксусная кислота и моноэтиленгликоль, которые образуются в реакторе и частично растворяются в воде на стадии абсорбции. Теоретическая растворимость ацетальдегида в сверхкритическом диоксиде углерода пренебрежимо мала. Растворимость уксусной кислоты экспериментально исследована в работе [3] для трехкомпонентной системы: вода–уксусная кислота–диоксид углерода.

Авторами сделан вывод, что при давлении и температуре ниже критических значений для бинарной смеси уксусная кислота – диоксид углерода коэффициент фазового распределения уксусной кислоты также будет очень низким.

В результате проделанного анализа по учету всех вышеперечисленных критериев для реализации экстракционной технологии выбраны следующие основные параметры технологического режима:  $T=318\text{K}$  и  $P=11,5\text{ МПа}$ . Моделирование экстракционной колонны подробно описано авторами в работе [4]. В этой работе проведен расчет оптимального количества теоретических ступеней разделения в колонне, а также обоснован тип используемых контактных устройств.

### Результаты и обсуждение

Для решения задачи выбора оптимальной, с точки зрения энергозатрат, технологии концентрирования и очистки оксида этилена из его водного раствора в среде *H<sub>2</sub>O* синтезированы три технологические схемы, которые моделируют традиционную и предлагаемую экстракционную технологии. Экстракционная технология (рис. 1), предполагает использование в качестве экстрагента чистого диоксида углерода. Схема состоит из колонны экстракции *T1*, в которой в противотоке контактируют насыщенный водный раствор оксида этилена и сверхкритический диоксид углерода. В результате экстракции практически весь оксид этилена переходит во флюидную фазу. Обедненный водный раствор из нижней части колонны возвращается в абсорбер (на схеме не показан), где снова обогащается оксидом этилена за счет контакта с реакционным газом. Концентрация примесей в циркулирующем сорбенте регулируется путем отвода части смеси и добавления чистой воды, т.е. так же, как и в традиционных схемах получения оксида этилена. Смесь оксида этилена и сверхкритического диоксида углерода из верхней части колонны *T1*, пройдя через регулирующий вентиль *V1*, поступает в колонну ректификации *T2* для очистки оксида этилена от диоксида углерода. Режим работы колонны *T2*: давление 6,8 МПа, температура верха 302,15, низа – 323,15 К.

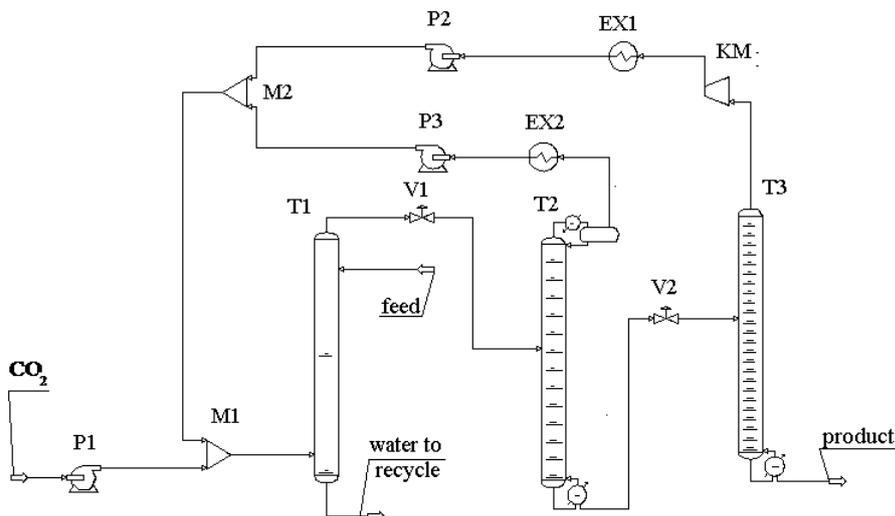


Рис. 1. Технологическая схема выделения оксида этилена из его водного раствора с использованием сверхкритического флюидного  $\text{CO}_2$  экстракционного процесса: *P* – насос; *M* – смеситель; *T* – колонна; *EX* – теплообменник; *V* – регулирующий вентиль; *KM* – компрессор

В качестве теплоносителя для подвода тепла в кипятыльник колонны *T1* используется теплая вода (отработанный конденсат). Для поддержания необходимой температуры

конденсации диоксида углерода в верхней части колонны необходима захлажденная вода, в связи с чем схема предполагает использование неглубокого искусственного холода. Диоксид углерода из верхней части колонны  $T2$  конденсируется в конденсаторе  $EX2$  и насосом  $P3$  возвращается рециклом в процесс. Оксид этилена из кубовой части колонны  $T2$  поступает в колонну  $T3$  для окончательной очистки. Как высококипящий компонент он концентрируется в нижней части колонны, а низкокипящие компоненты возвращаются рециклом в процесс, для чего предварительно сжимаются до давления конденсации, конденсируются и нагнетаются насосом в  $T1$ . В колонне  $T3$  поддерживается давление 1 МПа, температура в кипятильнике составляет 348,15 К. В качестве теплоносителя в кипятильнике используется горячая вода.

Соотношение диоксид углерода/сырье, равное 1,06/1 выбрано в результате оптимизационного расчета. В схеме предусмотрена циркуляция диоксида углерода, которая обеспечивается компрессором  $KM$  и насосами  $P2$ ,  $P3$ . Совокупная нагрузка на них составляет примерно 4 МВт. Вследствие больших потоков диоксида углерода нагрузка на конденсаторы достаточно существенна (47 МВт). Необходимость использования искусственного холода делает такую схему энергетически менее эффективной, чем традиционные схемы. Авторы патента [5] для улучшения технико-экономических показателей экстракционной схемы предлагают использовать добавки к экстрагенту, которые могут повысить температуру конденсации в верхней части колонны. При выборе добавки необходимо учитывать влияние выбранного вещества на сорбент и на качество реакционных газов, а вследствие наличия рециклов – и на основную реакцию. В качестве оптимальных добавок определены нормальные алканы [5]. Авторами настоящей работы этот процесс описан, однако не учтено наличие таких примесей, как ацетальдегид и уксусная кислота. В работе [6] сделан вывод о целесообразности использования в роли добавки пропана. При моделировании процесса выделения оксида этилена с использованием добавок появляется необходимость в очистке от них целевого продукта. Поэтому схема, изображенная на рис. 1, претерпевает некоторые изменения за счет включения в схему после колонны  $T3$  колонны для разделения смеси оксида этилена и н-алкана.

Расчетное исследование схемы сверхкритической флюидной экстракции оксида этилена из его водного раствора с использованием в качестве добавок н-бутана и н-пентана показывает, что в этом случае не удастся получить необходимую концентрацию целевого продукта. В частности, н-бутан образует с оксидом этилена азеотропную смесь, которую сложно разделить. Тогда как пропан, наоборот, хорошо отделяется от оксида этилена, что и предопределяет его выбор в качестве основной добавки.

Для сравнения вариантов технологического оформления процесса смоделирована и схема очистки оксида этилена традиционным методом (рис. 2). Так как различия между используемыми традиционными схемами очистки и концентрирования оксида этилена незначительны, при моделировании расчетной схемы за основу взята схема, описанная в патенте [7]. Из этого же источника заимствованы и основные параметры технологического режима работы установки (распределение профилей давления и температур).

На рис. 2 показана расчетная схема, моделирующая традиционную технологию выделения оксида этилена. Сырье из колонны абсорбции подается в колонну  $T1$ , в которой происходит выпаривание оксида этилена и легких примесей из сорбента. Температура, поддерживаемая в кипятильнике колонны  $T1$ , составляет 393÷388 К. Затем газ, отходящий из верхней части колонны  $T1$ , компремируется в компрессоре  $KM1$  и поступает в колонну  $T2$ . В  $T2$  происходит очистка газов от воды. Температура в кипятильнике 373 К. Далее смесь газов из верха колонны поступает в колонну  $T3$ , в которой из смеси отделяются летучие газы. Выделенные газы направляются в абсорбер, орошаемый водой. При этом газообразный оксид этилена абсорбируется, а диоксид углерода выводится с верха колонны и выбрасывается в атмосферу. В нижней части колонны  $T3$  концентрируются оксид этилена и

менее летучие газы. Кубовый остаток направляется в колонну окончательной очистки оксида этилена  $T4$  от более тяжелых примесных компонентов (ацетальдегидов). Оксид этилена в виде товарного продукта отводится из верхней части колонны  $T4$  в жидком состоянии. В результате моделирования определены характеристики всех потоков и нагрузки на основное оборудование, после чего проведен расчет и подбор основного оборудования.

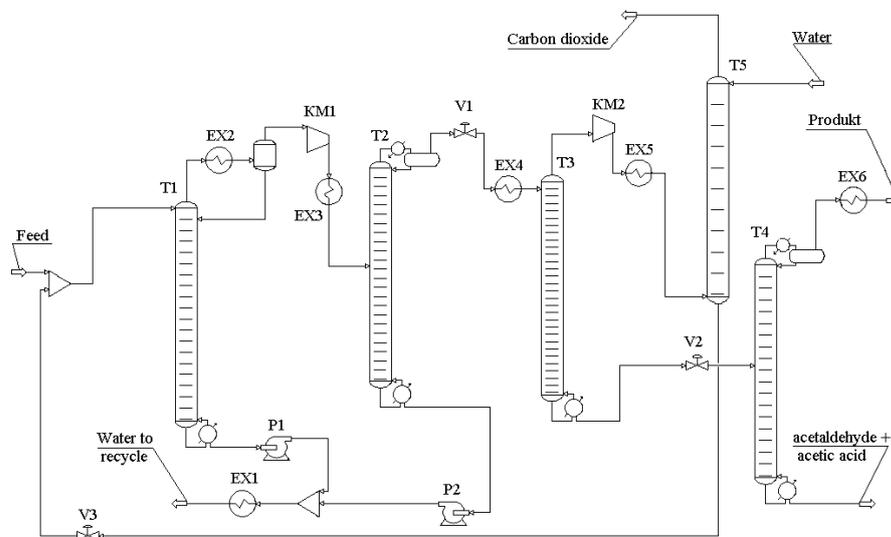


Рис. 2. Традиционная схема выделения оксида этилена из его водного раствора (обозначения см. рис. 1)

На основе моделирования схем разделения проведен сравнительный анализ всех трех схем: традиционной и разработанных в рамках настоящей работы экстракционных схем с использованием в качестве экстрагента сверхкритического диоксида углерода без добавки и с добавкой пропана (рис. 3). Как результат, тепловая нагрузка на кипятильники колонн для традиционной схемы значительно выше, чем в случае СК- $\text{CO}_2$  экстракционных схем. Одновременно следует отметить, что для традиционной схемы наибольшая тепловая нагрузка приходится на аппараты, работающие при температурах превышающих 373 К, что, как отмечено выше, ведет к образованию нежелательных побочных продуктов.

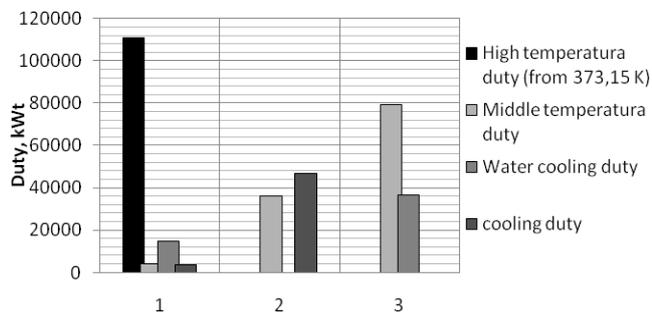


Рис. 3. Тепловые нагрузки на теплообменные аппараты: 1 – традиционная технология; 2 – экстракционная технология (без добавки пропана к экстрагенту); 3 – экстракционная технология (с добавкой пропана к экстрагенту)

Относительно тепловой нагрузки на теплообменное оборудование выявлено, что традиционная схема 1 заметно выигрывает у сравниваемых схем 2 и 3. Это объясняется тем обстоятельством, что при использовании экстракционной технологии возникает необходимость конденсации большого количества диоксида углерода, циркулирующего в системе разделения. По этой же причине экстракционные схемы проигрывают традиционной и в отношении затрат на обеспечение работы насосного оборудования. Наибольшая величина данных затрат характерна для схемы 3 (7 МВт). В то же время важное значение приобретает учет степени извлечения оксида этилена в сравниваемых технологиях. При использовании традиционной технологии она составляет 0,92, а при использовании экстракционной технологии – 0,82 для схемы 2 и 0,996 для схемы 3 соответственно. Поэтому при отнесении затрат к единице массы производимой продукции показатели экстракционной схемы 3 заметно возрастают.

В итоге, проведенное исследование позволяет сделать вывод о достаточно высокой эффективности использования экстракционного метода дегидратации и концентрирования оксида этилена с применением в качестве экстрагента сверхкритического диоксида углерода с добавкой пропана. Данная технология не требует использования высокопотенциального теплоносителя и искусственного холода, совокупная нагрузка на кипятильники колонн значительно ниже по сравнению с традиционной схемой, а степень извлечения продукта существенно превышает соответствующий показатель для существующей технологии. Добавление к экстрагенту пропана позволяет практически полностью очистить оксид этилена от диоксида углерода, который является наиболее вредной примесью.

#### Литература

1. Гумеров Ф.М., Сабирзянов А.Н., Гумерова Г.И. Суб- и сверхкритические флюиды в процессах переработки полимеров. Казань: «Фэн», 2007. 336 с.
2. Gumerov F.M., Sabirzyanov A.N. , Gumerova G.I. , Gabitov F.R. , Maksudov R.N., Kuznetsov E.V. Separation of ethylene oxide from its aqueous solution by supercritical fluid extraction. Theor. Found. Chem. Eng. 2006. Vol. 8, No. 3, P. 265–269.(doi.org/10.1134/S00405795060 30079) [Гумеров Ф.М., Сабирзянов А.Н., Гумерова Г.И., Габитов Ф.Р., Максудов Р.Н., Кузнецов Е.В. Выделение оксида этилена из его водного раствора в процессе сверхкритической экстракции // Теоретические основы химической технологии. 2006. Т. 40, № 3. С. 285–301.]
3. Brunner G. Supercritical Fluids as Solvents and Reaction Media. Hamburg, Germany : Elsevier, 2004. 650 p.
4. Ахметлатыйпова Д.Д., Гумеров Ф.М., Теляков Э.Ш., Габитов Ф.Р. Энергетический анализ перспектив применения сверхкритических технологий при получении оксида этилена // Бутлеровские сообщения. 2014. Т. 39, № 8. С. 113–118.
5. Bishe V.S., Hoch R. Process for separating ethylene oxide from aqueous solution. GreatBritainPatentno. 110 678AUS, 1983.
6. Ахметлатыйпова Д.Д., Хайруллин И.М. Сравнительный анализ использования инертных добавок при разделении смеси оксид этилена – диоксид углерода // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, № 18. С. 78–80.
7. Coles, Andrea Birgit et all. Metod for producing ethylene oxide. European patent no. 2 980 081 A1 2014.

#### Авторы публикации

*Ахметлатыйпова Дания Дамировна* – ассистент кафедры «Холодильная техника и технологии» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ). E-mail: daminija@mail.ru.

**Гумеров Фарид Мухамедович** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Теоретические основы теплотехники» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ). E-mail: tot@kstu.ru.

**Теляков Эдуард Шархиевич** – д-р технических наук, профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ).

#### References

1. Gumerov F.M., Sabirzyanov A.N., Gumerova G.I. Sub- i sverkhkriticheskie flyuidy v protsessakh pererabotki polimerov. Kazan': «Fen», 2007. 336 p.
2. Gumerov F.M., Sabirzyanov A.N. , Gumerova G.I. , Gabitov F.R. , Maksudov R.N., Kuznetsov E.V. Separation of ethylene oxide from its aqueous solution by supercritical fluid extraction. Theor. Found. Chem. Eng. 2006. Vol. 8. No. 3, R. 265–269.(doi.org/10.1134/S00405795060 30079) [Gumerov F.M, Sabirzyanov A.N, Gumerova G.N, Gabitov F.R, Maksudov R.N, Kuznetsov E.V. Vydelenie oksida etilena iz ego vodnogo rastvora v protsesse sverkhkriticheskoy ekstraktsii. Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii, 2006. Vol. 40. No. 3. P. 285–301.]
3. Brunner G. Supercritical Fluids as Solvents and Reaction Media. Hamburg, Germany : Elsevier, 2004. 650 p.
4. Akhmetlatyypova D.D., Gumerov F.M., Telyakov E.SH., Gabitov F.R. Energeticheskiy analiz perspektiv primeneniya sverkhkriticheskikh tekhnologiy pri poluchenii oksida etilena // Butlerovskie soobshcheniya. 2014. Vol. 39. No. 8. P. 113–118.
5. Bishe V.S., Hoch R. Process for separating ethylene oxide from aqueous solution. GreatBritanPatentno. 110 678AUS, 1983.
6. Akhmetlatyypova D.D., KHayrullin I.M. Sravnitel'nyy analiz ispol'zovaniya inertnykh dobavok pri razdelenii smesi oksid etilena-dioksid ugleroda // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2013. Vol. 16. No. 18. P. 78–80.
7. Coles, Andrea Birgit et all. Metod for producing ethylene oxide. European patent no. 2 980 081 A1 2014.

#### Authors of the publication

**Daniya D. Akhmetlatyypova** – assistant of refrigeration engineering and refrigerating machinery department, Kazan National Research Technological University, e-mail: daminija@mail.ru.

**Farid M. Gumerov** – dr. of technical sciences, professor of heat engineering department, Kazan National Research Technological University, e-mail: tot@kstu.ru.

**Eduard Sh. Telyakov** – dr. of technical sciences, professor of mechanical engineering for chemical industry department, Kazan National Research Technological University.

*Поступила в редакцию*

*07 марта 2018 г.*

УДК 681.7.06

## ФАЗОВО-ИЗОТРОПНЫЙ УГОЛКОВЫЙ ОТРАЖАТЕЛЬ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

А.С. Никитин, А.Н. Борисов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

drnikitin@rambler.ru ,dokbore@yandex.ru

**Резюме:** Работа посвящена разработке оптического устройства – фазово-изотропного уголкового отражателя, который может найти применение в качестве зеркала в волоконно-оптических преобразователях. Применение фазово-изотропных элементов позволяет уменьшить влияние набега фазы светового сигнала при отражении от зеркала, установленного в конце волоконного датчика. В работе проведен анализ существующих фазовых устройств и предложено устройство, использующее реальные пленкообразующие материалы, угол падения излучения и материалы призмы.

**Ключевые слова:** волоконно-оптический преобразователь, зеркало, уголкового отражатель, интерференционное диэлектрическое покрытие, показатель преломления, коэффициент отражения, фазовая анизотропия, поляризация излучения.

**DOI:**10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-110-117

## PHASE-ISOTROPIC CORNER REFLECTOR FOR FIBER-OPTIC CONVERTER.

A.S. Nikitin, A.N. Borisov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

drnikitin@rambler.ru ,dokbore@yandex.ru

**Abstract:** The article is devoted to the design of optical device – phase isotropic corner reflector, which may find application as a mirror in the fiber-optic converter. The use of phase-isotropic elements will reduce the effect of a light signal phase shift on reflection from the mirror mounted on the end of the fiber sensor. The work analyzes the existing phase devices and suggests a device using real film-forming materials, the angle of incidence of radiation, and the materials of the prism.

**Keywords:** Fiber-optic converter, a corner reflector, dielectric interference coating, refractive index, reflectance, phase anisotropy, polarization of the radiation.

Работа волоконно-оптического преобразователя тока основана на бесконтактном оптическом методе измерения электрического тока. Метод использует магнитооптический эффект Фарадея в кварцевом волоконном световоде. Принцип работы ВОПТ заключается в следующем. Две световые волны с ортогональными циркулярными поляризациями вводятся в многовитковый контур из специального световода, внутри контура находится проводник с током. Если тока в проводнике нет, световые волны распространяются по волоконному контуру с одинаковой фазовой скоростью и на выход контура приходят с нулевой относительной разностью фаз. При наличии в проводнике электрического тока световод оказывается в продольном магнитном поле протекающего тока. При этом

оптические свойства световода изменяются, и скорость распространения световых волн по контуру становится разной.

Таким образом, задача измерения тока волоконно-оптическим методом сводится к прецизионному измерению относительного фазового сдвига между световыми волнами  $\varphi_F$  в волоконном чувствительном контуре, находящемся в продольном магнитном поле электрического тока. Измерение фазовых сдвигов с высокой точностью можно реализовать, используя методы волоконно-оптической интерферометрии [1].

Основным признаком взаимного волоконного интерферометра является наличие малой разности оптических путей интерферирующих волн. Идеальным взаимным интерферометром является интерферометр с нулевой разностью оптических путей для рабочих световых волн. Такому условию удовлетворяют кольцевые интерферометры Саньяка и линейные отражательные интерферометры на ортогональных поляризаационных модах. Оба названных интерферометра можно использовать для измерения фарадеевского фазового сдвига, индуцируемого магнитным полем электрического тока. В волоконных преобразователях тока чаще используется отражательный волоконный интерферометр. Схема подобного интерферометра показана на рис. 1.

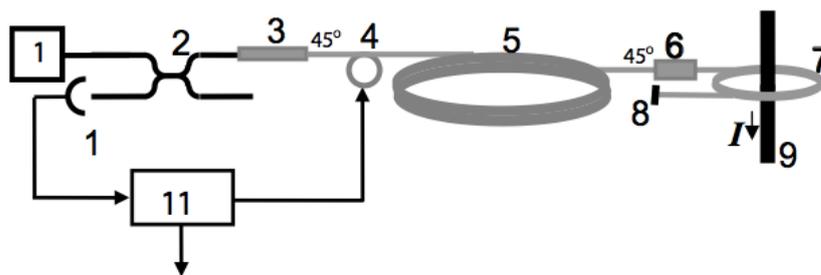


Рис. 1. Схема отражательного интерферометра.

В качестве источника излучения используется источник когерентного излучения 1. Излучение проходит через ответвитель 2 и попадает в волоконный поляризатор 3. Поляризатор возбуждает на входе волоконного пьезомодулятора 4 две линейно поляризованные световые волны равной интенсивности, но с ортогональными направлениями колебания вектора электрического поля ( $E_x$  и  $E_y$  моды). Пройдя модулятор, световые волны попадают в волоконную линию задержки 5, изготовленную из того же типа световода, что и модулятор. Далее линейно поляризованные моды с помощью четвертьволновой волоконной пластинки 6 конвертируются в ортогональные циркулярно поляризованные моды. Выход четвертьволновой пластинки соединен с волоконным контуром 7 на основе световода. Циркулярно поляризованные световые волны пробегают многовитковый контур в прямом направлении и, отражаясь от зеркала 8, распространяются в обратном направлении. При отражении лево-циркулярное состояние поляризации волны конвертируется в поляризационное состояние с правым вращением, и наоборот. Световые волны, распространяясь в обратном направлении, вновь проходят четвертьволновую пластинку, на выходе пластинки их поляризации конвертируются в линейные, но при этом волна, которая имела в прямом направлении  $x$  поляризацию, будет иметь при обратном распространении  $y$  поляризацию, и наоборот. В результате при отсутствии тока в пронизывающем чувствительный контур проводнике 9, оптический путь для обеих световых волн оказывается равным и волны на поляризатор 3 приходят с нулевой относительной фазой. Таким образом, имеем оптическую схему в которой компенсируются все взаимные фазовые сдвиги между световыми волнами, накопленные при их распространении в интерферометре. Однако зеркало 8 все же вносит свои коррективы в характеристики устройства, поскольку при отражении от любого зеркала имеют место изменения фазового состава излучения.

Данная работа посвящена разработке специального оптического устройства – фазово-изотропного уголкового отражателя, который с успехом может заменить зеркало, отмеченное позицией  $\delta$  на рис. 1, и повысить качество волоконно-оптических устройств, использующих в своей конструкции интерферометры и кольцевые оптические схемы.

В рассматриваемом нами оптическом устройстве в качестве зеркала применено так называемое «глухое» зеркало (непропускающее свет), причем чем выше коэффициент отражения таких зеркал, тем выше добротность резонатора. «Глухие» амплитудно- и фазово-изотропные зеркала (АФИЗ) обычно изготавливаются на основе традиционной зеркальной системы [2; 3]. Однако для обеспечения высокого (близкого к 1) коэффициента отражения требуется довольно большое число слоев. В связи с этим рассмотрим возможность конструирования АФИЗ на основе явления полного внутреннего отражения (ПВО). ПВО легко осуществить с помощью призмы. Действительно, если  $n$  – показатель преломления призмы, то при

$$\theta > \theta_{кр} = \arcsin(1/n) \quad (1)$$

на границе раздела отражающая грань призмы – воздух имеет место ПВО [4], то есть

$$R_s = R_p = 1. \quad (2)$$

Значение фазового сдвига между  $s$ - и  $p$ -компонентами изменяется с изменением  $\theta$ , причем сначала уменьшается от  $180^\circ$  (при  $\theta = \theta_{кр}$ ) до минимального значения:

$$\Delta_{\min} = 4 \arcsin \operatorname{tg}(1/n) \quad (3)$$

при

$$\theta_{\min} = \arcsin((2/(1+n^2))^{1/2}), \quad (4)$$

а затем возрастает до  $180^\circ$  (при  $\theta = 90^\circ$ ) [5]. Явление ПВО нередко используется для создания фазосдвигающих устройств (ФУ), обеспечивающих разность фазовых сдвигов для  $s$ - и  $p$ -поляризаций  $90^\circ$ . Из выражения (3) видно, что в случае использования одной границы раздела возможность получения  $\Delta = 90^\circ$  очень ограничена. Действительно, подставляя в (3)  $\Delta_{\min} = 90^\circ$ , найдем  $n = 2,414$  и  $\theta_{\min} = 32,8^\circ$ . Однако обычно применяемые для изготовления призм стекла, прозрачные в видимой области спектра, имеют показатель преломления  $\{1,45 - 1,8\}$ . Возможность достижения  $\Delta = 90^\circ$  при реальных значениях показателя преломления призмы, как показано в [6; 7], обеспечивается уже при нанесении одного слоя диэлектрика на грань призмы. Нанесение многослойных покрытий позволяет расширить спектральный диапазон, где выполняется это фазовое условие [8].

Призмённые уголкового отражатели, работающие на основе явления ПВО, также широко используются в качестве малорасстраивающих зеркал лазерных резонаторов [9]. При создании АФИЗ на основе явления ПВО, наряду с (2), необходимо обеспечить фазовую изотропию, т.е.  $\Delta = 0$ . Очевидно, что если  $\Delta = 90^\circ$ , как отмечалось выше, достигается при нанесении одного слоя на грань призмы, то достижение  $\Delta = 0$  может оказаться возможным при нанесении на грань призмы системы диэлектрических слоев. Такая возможность отмечалась в работе [10], однако детального исследования, позволяющего определять необходимое количество слоев при заданных показателях преломления слоев и призмы, проведено не было. Так, использование неправильного выражения для комплексного коэффициента отражения от системы диэлектрических слоев, нанесенных на грань призмы, привело автора работы к ошибочному выводу о необходимости использования большого количества слоев для достижения фазового сдвига, близкого к нулю. В настоящей работе эта задача решается методом эффективных границ.

Рассмотрим систему, состоящую из  $N$  слоев диэлектриков, расположенных на грани призмы. Разобьем эту систему на две подсистемы (I) и (II), разделенные слоем с номером  $m$  ( $m = 1, 2, \dots, N$ ). Нумерация слоев осуществляется от призмы к воздуху. Использование обобщенных формул Власова, полученных П.Г. Кардом [11], позволило нам получить следующее выражение для комплексного амплитудного коэффициента отражения этой системы:

$$\tilde{r} = \frac{\sqrt{\tilde{R}_1} \cdot \exp(i\tilde{\rho}_1) + \sqrt{\tilde{R}_2} \cdot \exp[i(\tilde{\rho}_2 + 2\tilde{\tau}_1 - 2\alpha_m)]}{1 + \sqrt{\tilde{R}_2 \tilde{R}_1} \cdot \exp[i(\tilde{\rho}_2 - \tilde{\rho}_1 + 2\tilde{\tau}_1 - 2\alpha_m)]}, \quad (5)$$

где  $\tilde{R}_1, \tilde{R}_2$  – энергетические коэффициенты отражения подсистем (I) и (II);  $\tilde{\rho}_1, \tilde{\rho}_2$  – соответствующие сдвиги фаз при отражении;  $\tilde{\tau}_1$  – сдвиг фазы при прохождении излучения через подсистему (I);  $\alpha_m$  – эффективная оптическая толщина слоя  $m$ , которую можно представить в виде

$$\alpha_m = (2\pi/\lambda)n_m d_m \cos \theta_m = g_m \varphi \cos \theta_m, \quad (6)$$

где  $g_m$  – оптическая толщина слоя  $m$  в долях  $\lambda_0/4$  ( $\lambda_0$  – контрольная длина волны);  $\varphi$  – относительная спектральная переменная;  $\theta_m = \arcsin(n \sin \theta / n_m)$  – угол преломления в слое  $m$ ;  $\theta$  – угол призмы.

Будем считать, что ПВО осуществляется только на границе последнего слоя с воздухом. Полагая в соответствии с этим  $\tilde{R}_2 = 1$ , после несложных преобразований получим из (5)

$$\tilde{r} = \exp \left[ i 2 \arcsin \operatorname{tg} \frac{\sqrt{\tilde{R}_1} \sin(\tilde{\rho}_1 + x/2) + \sin(x/2)}{\sqrt{\tilde{R}_1} \cos(\tilde{\rho}_1 - x/2) + \cos(x/2)} \right], \quad (7)$$

где

$$x = 2\alpha_m - \tilde{\rho}_2 - 2\tilde{\tau}_1. \quad (8)$$

Из (7) сразу получаем выражение для фазового сдвига при отражении от системы:

$$\tilde{\rho} = 2 \arcsin \operatorname{tg} \frac{\sqrt{\tilde{R}_1} \sin(\tilde{\rho}_1 + x/2) + \sin(x/2)}{\sqrt{\tilde{R}_1} \cos(\tilde{\rho}_1 - x/2) + \cos(x/2)}. \quad (9)$$

Значок «~» в приведенных выражениях означает, что они верны как для  $s$ - так и для  $p$ -поляризации. В случае  $s$ -поляризации всем величинам, стоящим под значком «~», следует приписать индекс  $s$  (например, вместо  $\tilde{R}_1$  будет  $R_1^s$ ), в случае  $p$ -поляризации – индекс  $p$ .

Решим теперь уравнение фазовой изотропии  $\rho_s = \rho_p$  относительно оптической толщины промежуточного слоя  $g_m$ . Для этого нужно приравнять в (9) выражения, стоящие под знаком  $\arcsin \operatorname{tg}$  для  $s$ - и  $p$ -поляризаций и решить полученное уравнение сначала относительно  $x$ , а затем, с учетом (6), (8), получить выражение для  $g_m$ . В результате ряда преобразований получаем следующее выражение:

$$g_m = \frac{\arcsin \operatorname{tg} z}{\varphi(1 - n^2 \sin^2 \theta / n_m^2)^{1/2}}, \quad (10)$$

где

$$z = \frac{N \pm (N^2 - 4ML)^{1/2}}{2M},$$

$$M = B^s D^p - B^p D^s,$$

$$N = A^s D^p - A^p D^s + B^s C^p - B^p C^s,$$

$$L = A^s C^p - A^p C^s,$$

в свою очередь,

$$\tilde{A} = \tilde{a} + \operatorname{tg} \tilde{\beta}, \quad \tilde{B} = 1 - \tilde{b},$$

$$\tilde{C} = 1 + \tilde{b}; \quad \tilde{D} = \tilde{a} - \operatorname{tg} \tilde{\beta},$$

и, наконец,

$$\tilde{a} = \sqrt{\tilde{R}_1} (\sin \tilde{\rho}_1 - \cos \tilde{\rho}_1 \cdot \operatorname{tg} \tilde{\beta}),$$

$$\tilde{\beta} = \frac{\tilde{\rho}_2}{2} + \tilde{\tau}_1.$$

При расчете величин  $\tilde{R}_1, \tilde{\rho}_1, \tilde{\tau}_1$  для подсистемы I следует учитывать, что исходной средой является призма, а подложкой – промежуточный слой. При расчете  $\tilde{\rho}_2$  для подсистемы II исходной средой является промежуточный слой, а подложкой – воздух.

Из (10) видно, что действительные значения  $g_m$  возможны при выполнении условия

$$\tilde{D} = N^2 - 4ML \geq 0. \quad (11)$$

Расчеты по выражениям (10), с учетом (11), должны проводиться для угла падения  $\theta$ , удовлетворяющего следующему неравенству:

$$\arcsin(1/n) < \theta < \arcsin(n_m/n). \quad (12)$$

Левая часть следует из требования наличия ПВО (1), а правая обеспечивает отсутствие ПВО внутри диэлектрических слоев покрытия.

При расчетах АФИЗ для лазерных резонаторов, как правило, конструктивным углом падения является  $\theta = 45^\circ$ . Нетрудно убедиться, что для практически используемых стекол и материалов слоев значение  $\theta = 45^\circ$  всегда удовлетворяет неравенству (12). Действительно, среди стекол, прозрачных в видимой области спектра, наибольшим показателем преломления ( $n = 1,8$ ) обладает стекло марки ТФ-10, а наименьшим – кварц ( $n = 1,45$ ). Среди материалов, используемых для производства тонкопленочных покрытий, наименьший показатель преломления имеет криолит ( $n = 1,33$ ). Подстановка этих значений в (12) приводит к неравенству, определяющему минимально возможный интервал для углов падения:

$$43,6^\circ < \theta < 47,6^\circ. \quad (13)$$

Как видно, угол  $\theta = 45^\circ$  попадает в этот интервал.

Анализ, проведенный с помощью выражений (10), (11), показал, что чем больше показатель преломления призмы и чем больше разница показателей преломления пары слоев с высоким и низким показателями преломления, тем меньшее количество слоев требуется для достижения фазовой изотропии при заданном  $\theta$ , удовлетворяющем неравенству (12). При использовании одного слоя (для  $\theta = 45^\circ$ ), даже если призма выполнена из стекла с максимально возможным показателем преломления, добиться выполнения условия  $\Delta = 0$  можно только при использовании слоев с очень большими показателями преломления ( $n_1 > 6$ ). Это следует из зависимости  $\bar{D}(n_1)$ , рассчитанной по выражению (11) и показанной на рис. 2.

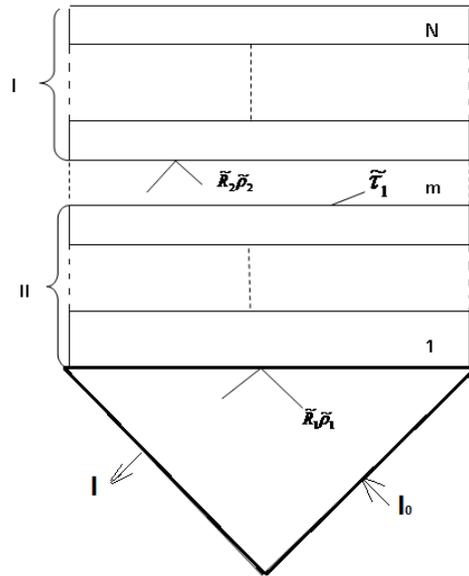


Рис. 2. Схематическое изображение призмы ПВО с нанесенной на ее грань системой из  $N$  диэлектрических слоев, разбитой на две подсистемы I и II, разделенные промежуточным слоем с номером  $m$ . Символами  $I_0$  и  $I$  показаны, соответственно, падающий и отраженный потоки излучения

Из рис. 1 видно, что условие  $\bar{D} > 0$ , при котором возможны действительные значения для оптической толщины слоя  $g_1$ , реализуются только при  $n_1 > 6$ . Разумеется, такие решения для практики не представляют интереса. С увеличением угла падения значения  $n_1$ , удовлетворяющие (11), уменьшаются (см. рис. 3). При достаточно больших углах падения

условие  $\Delta = 0$  может быть реализовано при реальных значениях  $n_1$  и  $n$ . Этот частный случай ранее был эмпирически найден в работе [12], где было показано, что при  $n = 1,50625$ ,  $n_1 = 2,05$ , фазовый сдвиг, близкий к нулю, может быть реализован для угла падения  $\theta = 77^\circ$ . Использование столь больших углов падения неприемлемо при использовании фазово-изотропного уголкового отражателя в качестве АФИЗ кольцевого лазерного резонатора. Для изготовления высокопрочных лазерных зеркал используются окислы металлов ( $ZrO_2, TiO_2, Ta_2O_5, SiO_2$ ). В качестве материала призмы лучше всего использовать стекло марки К-8 ( $n = 1,52$ ). Если выбрать в качестве материалов слоев  $ZrO_2$  ( $n_H = 1,97$ ) и  $SiO_2$  ( $n_L = 1,45$ ), то, используя полученные выше выражения, можно показать, что для реализации  $\Delta = 0$  (при  $n = 1,52$ ,  $\theta = 45^\circ$ ) на грань призмы достаточно нанести 5 чередующихся слоев. В этом случае, какой бы слой мы ни выбирали в качестве промежуточного, условие (11) всегда выполняется и, следовательно, нулевой фазовый сдвиг достигается при действительном значении оптической толщины этого слоя, определяемом, согласно (10), для любых разумных значений оптических толщин остальных слоев. На рис. 2 показаны спектральные зависимости  $\Delta(\varphi)$  для двух найденных таким образом решений.

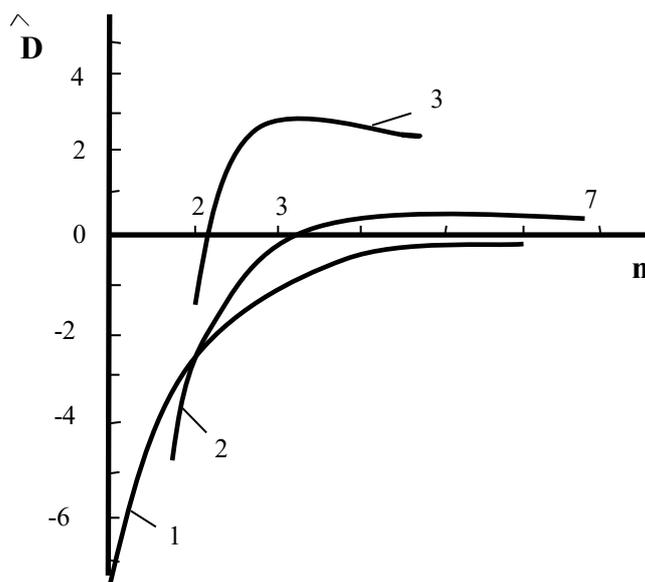


Рис. 3. Зависимость  $\hat{\Delta}(n_1)$  для однослойного покрытия, нанесенного на грань призмы ПВО при  $n=1,8$ ,  $\theta=45^\circ$  (кривая 1);  $n=1,8$ ,  $\theta=60^\circ$  (кривая 2);  $n=1,52$ ,  $\theta=75^\circ$  (кривая 3)

При использовании пленкообразующих материалов с большей разницей показателей преломления, например  $ZnS$  ( $n_H = 2,35$ ) и криолит ( $n_L = 1,33$ ), нулевой фазовый сдвиг достигается для трех (при  $n_1 = 1,52$ ) и даже для двух слоев (правда, в этом случае в качестве призмы необходимо использовать более высокопреломляющие стекла, например ТФ-1 ( $n = 1,642$ )). Соответствующие этим случаям решения также показаны на рис. 2.

Таким образом, призма ПВО с нанесенной на ее отражающую грань системой диэлектрических слоев может быть использована для создания «глухих» АФИЗ (при условии просветления входной и выходной граней призмы), причем число слоев, необходимое для реализации такого зеркала, значительно снижается.

### Литература

1. Гавричев В.Д., Дмитриев А.Л. Волоконно-оптические датчики магнитного поля: учебное пособие. СПб: СПбНИУ ИТМО, 2013. 83 с
2. Путилин Э.С., Губанова Л.А. Оптические покрытия учеб. Санкт-Петербург: Лань, 2016. 268 с.
3. Борисов А.Н., Черных В.Т., Арбузов В.А. Синтез интерференционного фильтра для ультрафиолетовой области спектра // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 1. С. 86–90.
4. Акиншин В.С. [и др.] Оптика: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2015. 240 с.
5. Бутиков Е.И. Оптика: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2012. 608 с.
6. Spiller E. Totally reflective film phase retarders. Appl. Opt. 1984. Vol. 23, No. 20. P. 3544–3549.
7. Southwell W.H. Multilayer coatings producing 90° phase change. Appl. Opt. 1979. Vol. 18, No. 11. P. 1875.
8. Southwell W.H. Multilayer coatings design achieving broadband 90° phase shift. Appl. Opt. 1980. Vol. 19, No. 16. P. 2688–2692.
9. Паршаков А.Н. Введение в квантовую физику: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2010. 352 с.
10. Корнеев В.И. Призмный уголкоый отражатель с диэлектрическими покрытиями // ОМП. 1985. № 12. С. 6–8.
11. Кард П.Г. Анализ и синтез многослойных интерференционных плёнок, Таллинн: Валгус, 1971, 235 с.
12. Введенский В.Д. [и др.]. Фазосдвигающее устройство на основе полного внутреннего отражения // ОМП. 1985. № 12. С. 6–8.

### Авторы публикации

**Никитин Александр Сергеевич** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Высшая математика» (ВМ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Борисов Андрей Николаевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

### References

1. Gavrichev V.D., Dmitriev A.L. Volokonno-opticheskie datchiki magnitnogo polya: uchebnoe posobie. SPb: SPbNIU ITMO, 2013. 83 p
2. Putilin E.S., Gubanova L.A. Opticheskie pokrytiya ucheb. Sankt-Peterburg: Lan', 2016. 268 p.
3. Borisov A.N., Chernykh V.T., Arbuzov V.A. Sintez interferentsionnogo fil'tra dlya ul'trafiuletovoy oblasti spectra. Pribory i tekhnika eksperimenta, 2017, No. 1, P. 86–90.
4. Akin'shin V.S. [i dr.] Optika: ucheb.posobie. Sankt-Peterburg: Lan', 2015. 240 p.
5. Butikov E.I. Optika: ucheb.posobie. Sankt-Peterburg: Lan', 2012. 608 p.
6. Spiller E. Totally reflective film phase retarders. Appl. Opt. 1984. Vol. 23. No. 20. P. 3544–3549.
7. Southwell W.H. Multilayer coatings producing 90° phase change. Appl. Opt. 1979, Vol. 18, No. 11. P. 1875.
8. Southwell W.H. Multilayer coatings design achieving broadband 90° phase shift. Appl. Opt. 1980. Vol. 19. No. 16. P. 2688–2692.
9. Parshakov A.N. Vvedenie v kvantovuyu fiziku: ucheb. posobie. Sankt-Peterburg: Lan', 2010. 352 p.
10. Korneev V.I. Prizmennyy ugolkovyy otrazhatel' s dielektricheskimi pokrytiyami // OMP. 1985. No. 12. P. 6–8.
11. Kard P.G. Analiz i sintez mnogoslonykh interferentsionnykh plenok. Tallinn: Valgus, 1971. 235 p.

12. Vvedenskiy V.D. [i dr.]. Fazosdviyayuschee ustroystvo na osnove polnogo vnutrennego otrazheniya // OMP. 1985. No. 12. P. 6–8.

**Authors of the publication**

***Nikitin AleksandrSergeevich*** – Cand. Sci. (phis.-math.), Associate Professor of Mathematics, Kazan State Power Engineering University.

***Borisov AndreyNikolaevich*** – Cand. Sci. (Techn.), professor of industrial electronics and lighting of Kazan State Power Engineering University.

***Поступила в редакцию***

***12 декабря 2017 г.***

УДК 539.143.44

## ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ В КОВЕЛЛИНЕ: ПОЛОЖЕНИЕ Cu1

А.И. Погорельцев<sup>1</sup>, В.Л. Матухин<sup>1</sup>, О.А. Сафонова<sup>1</sup>, А.Р. Шарипова<sup>1</sup>,  
Г.Н. Исламова<sup>1</sup>, Е.В. Шмидт<sup>1</sup>, Д.А. Шульгин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<sup>2</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет

им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия

apogoreltsev@rambler.ru

**Резюме:** Синтезированный образец ковеллина был исследован методами ЯКР <sup>63,65</sup>Cu. Экспериментально определенные значения квадрупольной частоты  $\nu_Q$  и параметра асимметрии  $\eta$  были использованы для изучения распределения электронной плотности в области квадрупольных ядер в положении Cu1. Обнаружено, что связь Cu-S в положении Cu1 является ионной, а щель LUMO-HOMO уменьшается с повышением температуры.

**Ключевые слова:** ядерный квадрупольный резонанс (ЯКР), градиент электрического поля (EFG), квадрупольные параметры, ab initio расчеты электронной структуры, распределение электронной плотности.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-118-128

## TOPOLOGICAL FEATURES OF THE ELECTRON DENSITY DISTRIBUTION IN COVELLITE: POSITION Cu1.

A.I. Pogoreltsev<sup>1</sup>, V.L. Matukhin<sup>1</sup>, O.A. Safonova<sup>1</sup>, A.R. Sharipova<sup>1</sup>, G.N. Islamova<sup>1</sup>,  
E.V. Shmidt<sup>1</sup>, D.A. Shul'gin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>2</sup>Education Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,  
Kazan, Russia

apogoreltsev@rambler.ru

**Abstract:** The synthesized sample of covellite was investigated by NQR <sup>63,65</sup>Cu methods. The experimentally determined values of the quadrupole frequency  $\nu_Q$  and the asymmetry parameter  $\eta$  have been used to study the distribution of electron density in the region of the quadrupole nuclei in position Cu1. It is found that Cu-S bond in position Cu1 is ionic, and the gap LUMO-HOMO decreases with increasing temperature.

**Keywords:** nuclear quadrupole resonance (NQR), electric field gradient (EFG), quadrupole parameters, ab initio calculations of electronic structure, electron density distribution.

### Введение

Медные сульфиды, к которым относится ковеллин (CuS), широко используются как элементы солнечных батарей [1–4], в электропроводящих слоях на поверхностях полимеров

[5], в газовых сенсорах [6–9], как каталитические материалы для фотохимических преобразователей солнечной энергии [10; 11] и т.д. Все фазы группы соединений  $\text{Cu}_x\text{S}$  ( $x=1-2$ ) относятся к полупроводникам  $p$ -типа из-за наличия медных вакансий в решетке [12].

Основу структуры ковеллина составляет гексагональный (пространственная группа  $\text{C6}_3/\text{mms}$ ) трехслойный пакет *ABA* (достаточно хорошо просматривается на кластере – см. ниже). Слой *A* слогаается тетраэдрами  $\text{CuS}_4$ . Слой *B* представляет собой сетку из треугольников  $\text{S}_3$ , в центрах которых находятся атомы  $\text{Cu}$ . В пределах пакета тетраэдры ориентированы своими вершинами навстречу друг другу, имея общими атомы  $\text{S}$  слоя *B*. Комбинация плоскостной структуры и электрических свойств делают ковеллин уникальным среди бинарных сульфидов – он имеет низкое электрическое сопротивление ( $\sim 10^{-7}$  ом\*м), полупроводниковую зонную щель (1,27-1,75эВ [13; 14]), и после фазового перехода в орторомбическую фазу при 55К становится сверхпроводником при 1,7К.

В настоящей работе представлены результаты исследований топологии распределения электронной плотности в искусственном образце ковеллина в области  $\text{Cu}1$ .

### Синтез образцов и методика эксперимента

Порошковый образец  $\text{CuS}$  синтезировался прямой реакцией элементов меди и серы высокой чистоты. Смесь медной фольги чистоты 99,9985% и серы кристаллической чистоты 99,999% была нагрета до 450°C и выдержана при этой температуре в течение 2 недель в вакуумной кварцевой трубе. Далее состав был охлажден и спрессован в форму диска, после этого полученное вещество было помещено в вакуумную кварцевую трубу, нагрето до 400°C и выдержано при этой температуре в течение 3 недель. Синтезированный образец ковеллина был подтвержден рентгеновским анализом.

Измерения спектров ЯКР  $^{63,65}\text{Cu}$  проводились на многоимпульсном спектрометре ЯКР *Tecmag-Redstone* с использованием накопителя сигналов спинового ЯКР эха и детектированы в интервале температур 1,7–300 К.

Гамильтониан ядерного квадрупольного взаимодействия может быть записан в виде

$$H = \frac{e^2 q Q}{4J(2J-1)} [3I_z^2 - I^2 + \frac{\eta}{2}(I_+^2 + I_-^2)]. \quad (1)$$

В частности, для ядер со спином  $I = 3/2$  ( $^{63,65}\text{Cu}$ ) частоты ЯКР будут иметь вид

$$\nu_Q = \frac{1}{2} e^2 Q V_{zz} (1 + \frac{\eta^2}{3})^{1/2}, \quad (2)$$

где  $V_{zz}$  – наибольшая из главных осей тензора градиента электрического поля (ГЭП);  $\eta$  – параметр асимметрии  $\eta = (|V_{xx}| - |V_{yy}|) / |V_{zz}|$ ;  $eQ$  – ядерный электрический квадрупольный момент данного квадрупольного ядра.

### Результаты и расчеты

Температурная зависимость частоты ЯКР  $^{63}\text{Cu}$   $\nu(T)$  была изучена в температурном диапазоне 1,7÷300К. Частота характеризуется линейной зависимостью  $d\nu/dT = 1,1$  kHz/К,  $\nu(1,7\text{K}) = 14,83$  МГц. Как правило, для некубических металлов эта зависимость характеризуется согласно закону  $T^{3/2}$ , который соответствует линейной связи между электронной частью градиента электрического поля и фактором Дебая-Валлера:

$$\nu_Q = \nu_Q^0 (1 - \alpha T^{3/2}), \quad (3)$$

где  $\nu_Q^0$  – частота ЯКР при 0 К в отсутствии электронно-фононного взаимодействия;  $\alpha$  – константа;  $T$  – температура. Температурная зависимость частот ЯКР  $^{63}\text{Cu}$  ковеллина  $\text{CuS}$  от 4 до 300 К показана на рис. 1. Как видно из приведенного рисунка, наблюдается

монотонный рост частоты ЯКР  $^{63}\text{Cu}$  по мере уменьшения температуры от 300 до 60 К, что отражено на рисунке посредством аппроксимирующей прямой. Далее температурная зависимость  $\nu_Q(T)$  заметно уменьшает угол наклона (есть область плато) вплоть до температур  $\sim 7$  К. Особенности поведения температурной зависимости  $\nu(T)$  при температурах ниже 60 К, вероятнее всего связаны с переходом исследуемого соединения в орторомбическую фазу при 55 К.

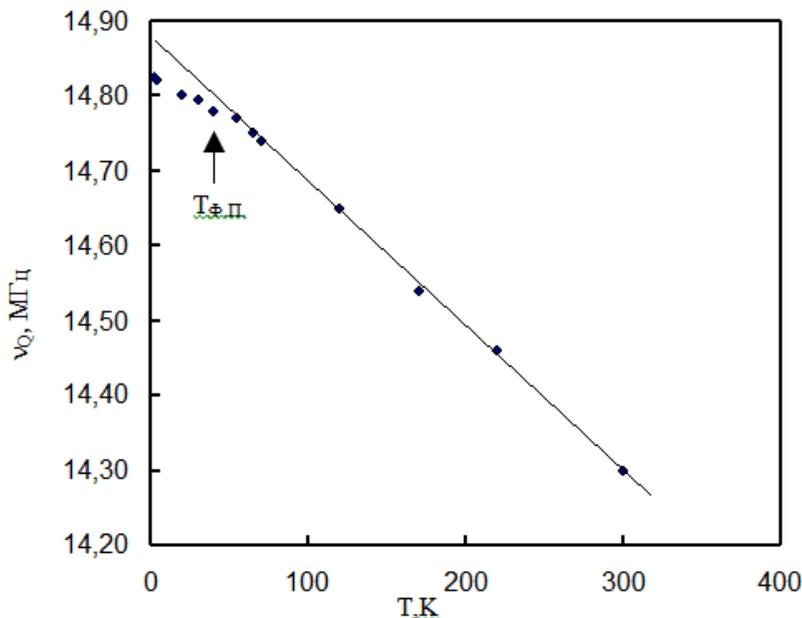


Рис. 1. Температурные зависимости частот ЯКР  $^{63}\text{Cu}$  ковелина CuS

Нами были выполнены *ab initio* оценки ГЭП на ядрах меди с “опорой” на квадрупольные параметры (в данном случае – это ЯКР частота  $\nu_Q$ ) в системе CuS. Оценки ГЭП на ядрах меди были выполнены *ab initio* методом с использованием кластерного подхода. Расчеты проведены в рамках самосогласованного ограниченного метода Хартри – Фока с открытыми оболочками (*SCF-LCAO-ROHF*, базис *MINI*) с помощью программы *FIREFLY* [15]. Наибольший кластер, для которого проводили расчеты, имел формулу (для позиции Cu1)  $\text{Cu}_{21}\text{S}_{30}^n$  ( $R \sim 6\text{\AA}$ , 51 атом) (рис. 2), где  $n$ -заряд кластера, который необходимо определить исходя из полученных в эксперименте квадрупольных параметров. Следует отметить, что размеры кластера существенным образом влияют на величину ГЭП и, соответственно, на частоту ЯКР: у кластеров меньших размеров значения частот заметно выше наблюдаемых в эксперименте. Поэтому, на наш взгляд, величина ГЭП в данной позиции во многом определяется решеточным вкладом (первое слагаемое в выражении (4)).

Вклад в ГЭП учитывали в виде двух слагаемых: вклад от ионного остова кристалла и вклад от электронного окружения ядра (соответственно первое и второе слагаемые в выражении

$$q_{\alpha\beta}(A) = -\sum_k Z_k \{3(r_{k\alpha} - A_\alpha)(r_{k\beta} - A_\beta) - \delta_{\alpha\beta} |r_k - A|^2\} / |r_k - A|^5 + 2\sum_i \langle \phi_i | \{3(r_{\alpha} - A_\alpha)(r_{\beta} - A_\beta) - \delta_{\alpha\beta} |r - A|^2\} / |r - A|^5 | f_i \rangle, \quad (4)$$

где индексы  $\alpha$  и  $\beta$  пробегают значения  $x, y, z$ ;  $A$  – позиция ядра (радиус-вектор ядра), на котором вычисляются компоненты тензора ГЭП;  $r$  – радиус-вектор положения электрона; индекс  $k$  проходит все номера ядер с зарядами  $Z_k$ ; при этом  $r_k=A$  не учитывается. Суммирование по индексу  $i$  означает суммирование по всем электронам на занятых молекулярных орбиталях;  $\varphi_i$  – волновая функция  $i$ -й молекулярной орбитали.

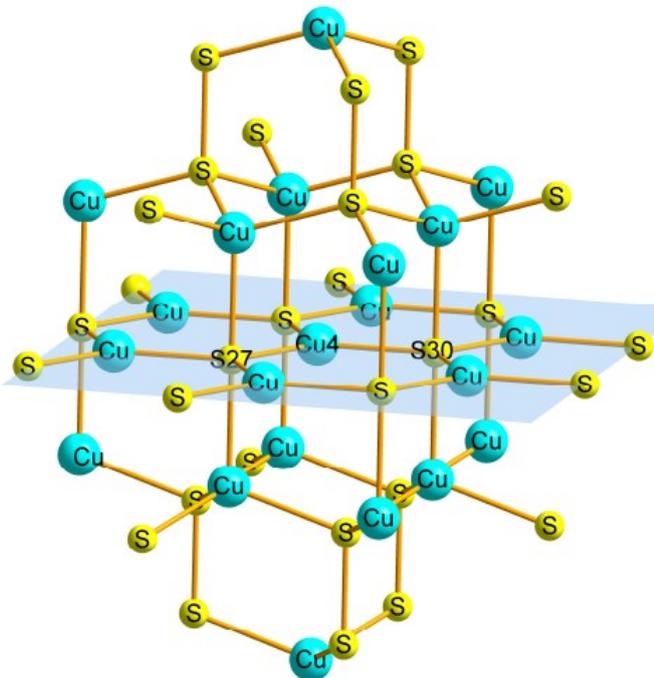


Рис. 2. Кластер  $\text{Cu}_{21}\text{S}_{30}^n$ . Центральный атом Cu4 относится к позиции CuI. Показана исследуемая плоскость S30-Cu4-S27

В настоящей работе, исходя из возможных валентных состояний атомов, расчеты ГЭП проводили в диапазоне  $-39 \leq n \leq 3$ , то есть для 43 точек. Величины частот получали с учетом величины ядерного квадрупольного момента меди  $Q(^{63}\text{Cu}) = -0,211b$ .

С учетом выполненной аппроксимации были найдены три точки, которые неплохо соответствуют температурной зависимости частоты ЯКР: 1.  $n=-1$ ,  $\nu=14,7\text{МГц}$ ,  $\eta=0,0214$ ; 2.  $n=-2$ ,  $\nu=14,368\text{МГц}$ ,  $\eta=0,1025$ ; 3.  $n=-10$ ,  $\nu=14,20\text{МГц}$ ,  $\eta=0,008$ . Принимая во внимание возможную «затянутость» фазового перехода вверх по температуре [9] до 90 К, можно предположить, что точка 1 принадлежит области фазового перехода, точка 3 – состоянию при комнатной температуре и точка 2 – некоторой промежуточной области. Для данных кластеров были проведены детальные расчеты, в том числе построены карты распределения электронной плотности в области квадрупольного ядра Cu-центральный атом меди.

#### Анализ и обсуждение

Анализ проводился в рамках теории Р. Бейдера [16]. Электронная плотность  $\rho(r)$  является скалярной функцией, имеющей максимумы, минимумы и седловые точки. Согласно Р. Бейдеру эти особенности можно охарактеризовать полем градиента электронной плотности (ЭП)  $\nabla \rho(r;R)$ , среди которого выделяют критические точки ЭП – точки, где градиент ЭП  $\nabla \rho(r)$  равен нулю. Сорт и количество критических точек определяют строение многоэлектронной системы и взаимодействия в ней. Чтобы охарактеризовать сорт

критической точки, вычисляют вторые производные ЭП, которые составляют симметричную действительную матрицу размером  $3 \times 3$  (гессиан  $\partial^2 \rho / \partial x_i \partial x_j$ ). В окрестности энергетически стабильных конфигураций ядер критические точки  $\rho(r)$  имеют ранг 3. Если ранг  $p < 3$ , то критическая точка нестабильна. Возможны всего четыре невырожденные критические точки ЭП: (3, -3), (3, -1), (3, 1), (3, 3). Критические точки (3, -3) отвечают локальным максимумам ЭП, которые совпадают с положениями ядер; точка (3, 1) называется циклической критической точкой и важна для анализа циклических структур; точка (3, 3) соответствует локальному минимуму ЭП и важна для анализа клеточных структур. Критическая точка (3, -1) играет особую роль, собственный вектор гессиана, отвечающий положительной кривизне в данной точке, задает исходные направления двух градиентных траекторий, которые заканчиваются в двух соседних ядрах. Они определяют линию связи: ЭП вдоль этой линии максимальна по отношению к любым малым боковым смещениям [12]. Существование линии связи является необходимым условием образования связи между атомами в стабильной равновесной системе.

На рис. 3 показана контурная карта распределения электронной плотности в области квадрупольного ядра меди в плоскости, проходящей через центральный атом меди Cu4 (позиция Cu1) и атомы серы из тригонального окружения S26, S27, S30, построенная для кластера  $\text{Cu}_{21}\text{S}_{30}^{-1}$ .

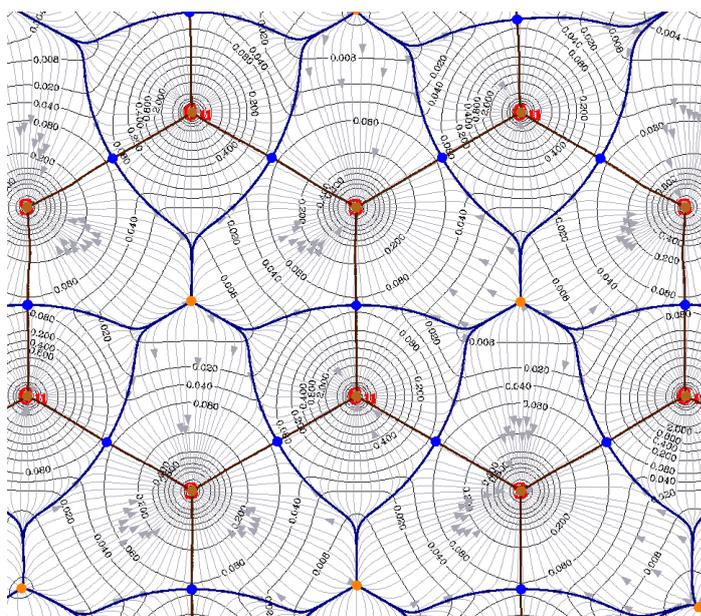


Рис. 3. Контурная карта распределения электронной плотности в области квадрупольного ядра меди в плоскости S30-Cu4-S27- S26 кластера  $\text{Cu}_{21}\text{S}_{30}^{-1}$ . Маленькие кружки на линиях связи – критические точки (3,-1)

Изолинии на карте распределения электронной плотности строились с переменным шагом: 0,0 0,001 0,002 0,004 0,008 0,02 0,04 0,08 .... -0,001 -0,002 -0,004 -0,008 -0,02 -0,04 -0,08.... (эл./ $\text{\AA}^3$ ). Линии, пересекающие в точках (3, -1), – линии связи, являются поверхностями нулевого потока вектора градиента электронной плоскости и определяют бассейн каждого атома, соответственно, на градиентных линиях стрелки указывают направление градиента электронной плотности.

Ценную физическую и химическую информацию дает также лапласиан электронной плотности  $\nabla^2\rho = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$ . Здесь  $\lambda_i$  – собственные значения Гессиана  $\partial^2\rho/\partial x_i\partial x_j$ . Электроны концентрируются в регионах, где  $\nabla^2\rho < 0$  и деконцентрируются там, где  $\nabla^2\rho > 0$ . Разность между локальным значением и средним в ближайшей окрестности максимальна в критических точках ЭП. Особенно это важно при рассмотрении критической точки (3, -1). Если ЭП в данной точке превышает среднее значение ЭП в соседних точках, то  $|\lambda_1/\lambda_3| > 1$  и  $\nabla^2\rho < 0$  – это означает, что ЭП концентрируется вокруг критической точки и взаимодействие атомов можно отнести к ковалентному типу. В противном случае  $\nabla^2\rho > 0$  и ЭП оказывается смещенной к каждому из взаимодействующих атомов и сконцентрированной в атомных бассейнах.

Анализ полученных собственных значений Гессиана  $\partial^2\rho/\partial x_i\partial x_j$  приводит к выводу, что для всех линий связи всегда  $|\lambda_1/\lambda_3| < 1$ . Таким образом можно предположить, что в ковеллине атомы меди в позициях Cu1 связаны с атомами серы благодаря концентрации электронной плотности внутри бассейна каждого атома и, следовательно, данная связь образуется по типу взаимодействия закрытых оболочек.

На рис. 4 показан фрагмент рельефной карты лапласиана электронной плотности для атомов плоскости S30-Cu4-S27-S26 кластера  $\text{Cu}_{21}\text{S}_{30}^{-1}$ . Показан только фрагмент, включающий интересующие нас атомы (остальные вырезаны). Кольцевые гребни на границах бассейнов атомов серы ( $\nabla^2\rho < 0$ ) указывают на заметное уменьшение кинетической энергии электронов (соответственно, их подвижности) в данных областях. Напротив, впадины на периферии бассейна атома меди ( $\nabla^2\rho > 0$ ) указывают на увеличение кинетической энергии (подвижности) электронов в данной области. Таким образом, полученная картина распределения лапласиана электронной плотности (рис. 5) достаточно хорошо соответствует ионному характеру связи [17].

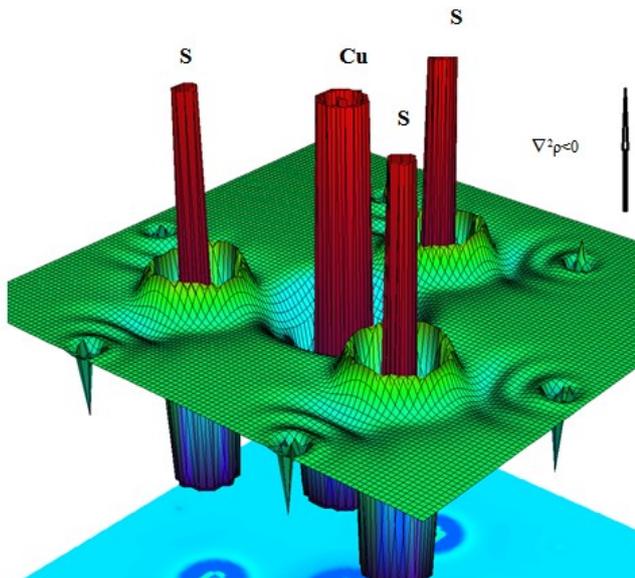


Рис. 4. Фрагмент рельефной карты лапласиана электронной плотности для атомов плоскости S30-Cu4-S27- S26 кластера  $\text{Cu}_{21}\text{S}_{30}^{-1}$

Иной подход к исследованию распределения электронной плотности используется при использовании методов функции локализации электронов (ELF) [18].

Функция  $ELF$  определяется как

$$ELF = \eta(\vec{r}) = \frac{1}{1 + \left( \frac{D_{\uparrow}(\vec{r})}{D_{h\uparrow}(\vec{r})} \right)} \quad (5)$$

Функция  $D_{\uparrow}(\vec{r})$  называется плотностью кинетической энергии Паули. Она характеризует локализацию электрона со спином  $\uparrow$  вблизи точки  $r$ . В системах с замкнутыми электронными оболочками функция  $D_{\uparrow}(\vec{r})$  показывает также степень локализации электронной пары с противоположными спинами, в то время как все остальные электронные пары будут удалены из области, окружающей точку  $r$ , где локализована данная пара. Чем меньше  $D_{\uparrow}(\vec{r})$  (т.е. чем ниже вероятность найти второй электрон с таким же спином вблизи точки  $r$ ), тем сильнее локализован опорный электрон.  $D_{h\uparrow}(\vec{r})$  – плотность кинетической энергии однородного газа электронов со спином  $\uparrow$ :

$$D_{h\uparrow}(\vec{r}) = \frac{2}{5} (\pi n^2)^{2/3} [\rho_{\uparrow}(\vec{r})]^{1/3}. \quad (6)$$

$ELF$  лежит в диапазоне значений  $0 \leq \eta(r) \leq 1$ : в областях пространства, где  $\eta(r) \rightarrow 1$ , кинетическая энергия электронов уменьшается и наблюдается локализация электронных пар, тогда как  $\eta(r) = 1/2$  соответствует электронной делокализации, которая имеет место в однородном электронном газе.

На рис. 5 показана карта распределения функции локализации электронов ( $ELF$ ) в позиции меди Cu1.

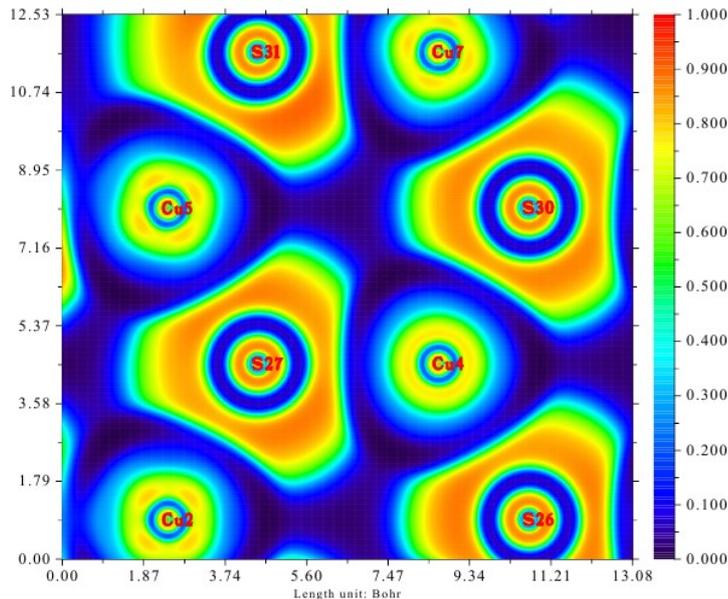


Рис. 5. Карта распределения функции локализации электронов ( $ELF$ ) в позиции меди Cu1

Как видно из рисунка, цветовое распределение  $ELF$  достаточно хорошо коррелирует с формой бассейнов атомов на карте распределения электронной плотности (рис. 3), ограниченных базисными плоскостями. В свою очередь, наблюдаемое чередование слоев с высокой и низкой концентрацией электронных пар хорошо связывается с распределением

лапласиана электронной плотности (рис. 4), т.е. с кинетической энергией (подвижностью) электронов. Из приведенного рисунка также видно, что несмотря на то, что у атомов серы наблюдается заметная концентрация неспаренных электронов на периферии ( $ELF \sim 0,85$ ), у атомов меди на периферии  $ELF \sim 0,05$ , что может быть связано с высокой кинетической энергией (подвижностью) электронов. Необходимо также принимать во внимание общее уменьшение электронной плотности по мере движения от центра атома к периферии (рис. 3). В целом, приведенная на рис.5 карта распределения  $ELF$  указывает на высокую степень ионности связи Cu-S.

Для исследуемого кластера проводился анализ энергетических уровней молекулярных орбиталей и, в частности, был выполнен анализ *LUMO* (Молекулярная орбиталь с минимальной энергией, которая не содержит электронов.) и *HOMO* (высшая занятая электронами молекулярная орбиталь). Были, в частности, получены следующие значения для величины щели *LUMO – HOMO*: **1.**  $n=-1$ ,  $\nu=14,7$  МГц,  $\Delta \sim 1,6$  eV; **2.**  $n=-2$ ,  $\nu=14,368$  МГц,  $\Delta \sim 0,45$  eV; **3.**  $n=-10$ ,  $\nu=14,20$  МГц,  $\Delta \sim 0,3$  eV. Таким образом, наблюдается заметное уменьшение щели *LUMO – HOMO* с повышением температуры. Здесь необходимо отметить, что рассчитанные значения щелей *LUMO – HOMO* заметно меньше величин, наблюдаемых в экспериментах. На наш взгляд это связано с относительной «грубостью» модели расчета, используемой в данной работе.

### Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Оценки ГЭП на ядрах меди, проведенные *ab initio* методом с использованием кластерного подхода с опорой на эксперимент (см. в частности, [19]), дают значения ЯКР частот, которые достаточно хорошо соответствуют данным, полученным нами в процессе экспериментальных температурных ЯКР исследований ковеллина.

Использование в настоящей работе различных подходов к изучению распределения электронной плотности повышает эффективность проводимых исследований – они уточняют и дополняют друг друга, позволяя сделать более адекватные выводы.

В результате проведенного анализа можно заключить, что связь Cu-S в позиции Cu1 для температур порядка 70 К весьма близка к ионному типу.

Наблюдается заметное уменьшение щели *LUMO – HOMO* с повышением температуры, что характерно для полупроводниковых соединений. В то же время рассчитанные значения щелей *LUMO – HOMO* заметно меньше величин, наблюдаемых в экспериментах. По этой причине используемая при проведении расчетов модель нуждается в определенных коррективах, в частности необходим более детальный учет обменных и корреляционных эффектов.

### Литература

1. J.C. Osuwa and E.C. Mgbaja. Structural and Electrical Properties of Copper Sulfide (CuS) Thin Films doped with Mercury and Nickel impurities. IOSR Journal of Applied Physics Vol. 6. Iss. 5. 2014, P. 28–31.
2. J.C. Osuwa and E.C. Mgbaja. Effects of mercury and nickel impurities on optical properties of copper sulfide (CuS) thin films deposited by chemical bath technique. IOSR Journal Of Environmental Science. Vol. 5. Iss. 2. 2013. P. 27–31.
3. Osuwa J.C. and Onyejiuwa, G.I. Structural and Electrical properties of annealed Nickel Oxide(NiO) thin films prepared by chemical bath deposition. Journal of Ovonic Research. 2013. No. 9 (1). P. 9–15.
4. Ezenwa I.A. Effects of deposition time on the absorbance of chemical bath deposited CuS thin films. Research Journal of engineering sciences. 2013. No. 2 (1). P. 1–4.
5. Ajaya Kumar Singh. Synthesis of copper sulphide(cus) thin film by chemical bath deposition method and its characterization. Ajaya Kumar Singh, Swati Mehra, Gautam Sheel Thool. European Chemical Bulletin. 2013. No. 2 (8). P. 518–523.

6. Dhondge A.D., Gosavi S.R., Gosavi N.M., Sawant C.P., Patil A.M., Shelke A.R. and Deshpande N.G. Influence of Thickness on the Photosensing Properties of Chemically Synthesized Copper Sulfide Thin Films. World Journal of Condensed Matter Physics, 2015. No. 5. P. 1–9. <http://dx.doi.org/10.4236/wjcmp.2015.51001>.

7. Wu C., Zhang Z., Wu Y., Lv P., Nie B., Luo L., Wang L., Hu J. and Jie J. Flexible CuS Nanotubes-ITO Film Schottky Junction Solar Cells with Enhanced Light Harvesting by Using an Ag Mirror. Nanotechnology, 2013. No. 24, Article ID: 045402. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-4484/24/4/045402>.

8. Peng H., Ma G., Sun K., Mu J., Wang H. and Lei Z. High-Performance Supercapacitor Based on MultiStructural CuS@Polypyrrole Composites Prepared by in Situ Oxidative Polymerization. Journal of Materials Chemistry, 2014. A, 2. P. 303–3307. <http://dx.doi.org/10.1039/c3ta13859c>.

9. Xu J., Zhang J., Yao C., Dong H. and Chil J. Synthesis of Novel Highly Porous CuS Golf Balls by Hydro thermal Method and Their Application in Ammonia Gas Sensing. Journal of the Chilean Chemical Society, 2013. No. 58, P. 1722–1724. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-97072013000200017>.

10. Syamanta K. Goswamia, Jungdong Kim, Kimin Hong, Eunsoon Oh, Yiming Yang, Dong Yu. Photocurrent and photovoltaic characteristics of copper sulfide nanowires grown by a hydrothermal method. Materials Letters, 2014. No. 133. P. 132–134.

11. M. Annie Freeda\*, C.K. Mahadevan. Effect of Zn<sup>2+</sup> doping on CuS nanocrystals. MSiAIJ, 2013. No. 9 (8). P. 283–288.

12. S. Li, H. Z. Wang, Wei Wei Xu, Hong Lei Si, XiaoJun Tao, Shiyun Lou, Zuliang Du, Lin Song Li, Synthesis and assembly of monodisperse spherical Cu<sub>2</sub>S nanocrystals. J. Colloid. Interf. Sci. 2009. Vol. 330. P. 483.

13. A.E. Raevskaya, A.L. Stroyuk, S.Ya. Kuchmii, A.I. Kryukov. Catalytic activity of CuS nanoparticles in hydrosulfide ions air oxidation. J. Mol. Catal. A-Chem. 2004. Vol. 212, P. 259–265.

14. Budiman M.F., Hu W., Igarashi M., Tsukamoto R., Isoda T., Itoh K.M., Yamashita I., Murayama A., Okada Y. and Samukawa S. Control of Optical Bandgap Energy and Optical Absorption Coefficient by Geometric Parameters in Sub-10 nm Silicon-Nanodisc Array Structure. Nanotechnology, 2012. 23, Article ID: 065302.

15. Granovsky A.A. Firefly version 8.1, 2014 (<http://classic.chem.msu.su/gran/firefly/index.html>).

16. Bader R.F.W. Atoms in Molecules – A Quantum Theory. Oxford University Press, Oxford. 1990.

17. A.I. Pogoreltsev, V.I. Matuhin, E.V. Gazeeva, E.V. Schmidt, D.A. Shulgin. Investigation of the temperature dependence of the NQR parameters in covellite. Materials Science Forum. Vol. 845, pp 69–72 [doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.845.69](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.845.69) © 2016 Trans Tech Publications, Switzerland.

18. A.D. Becke and K.E. Edgecombe. A simple measure of electron localization in atomic and molecular systems. J. Chem. Phys. Volume 92, Iss 9, May 1, 1990. P. 5397–5403.

19. Погорельцев А.И., Гавриленко А.Н., Матухин В.Л., Корзун Б.В., Шмидт Е.В. Особенности распределения электронной плотности в CuFeS<sub>2</sub> по данным ЯМР <sup>63,65</sup>Cu в локальном поле // Журнал прикладной спектроскопии. 2013. Т. 80. С. 361–367.

#### Авторы публикации

**Погорельцев Александр Ильич** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: [pogoreltsev@rambler.ru](mailto:pogoreltsev@rambler.ru).

**Матухин Вадим Леонидович** – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Сафонова Ольга Александровна** – студент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Шаринова Алия Рустемовна** – студент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Исламова Гульчачак Назимовна** – студент кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Шмидт Екатерина Вадимовна** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Шульгин Дмитрий Анатольевич** – канд. физ.-мат. наук, доцент, научный консультант центра коллективного пользования «Прикладные нанотехнологии» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ).

### References

1. J.C. Osuwa and E.C. Mgbaja. Structural and Electrical Properties of Copper Sulfide (CuS) Thin Films doped with Mercury and Nickel impurities. IOSR Journal of Applied Physics Vol. 6. Iss. 5. 2014, P. 28–31.
2. J.C. Osuwa and E.C. Mgbaja. Effects of mercury and nickel impurities on optical properties of copper sulfide (CuS) thin films deposited by chemical bath technique. IOSR Journal Of Environmental Science. Vol. 5. Iss. 2. 2013. P. 27–31.
3. Osuwa J.C. and Onyejiuwa, G.I. Structural and Electrical properties of annealed Nickel Oxide(NiO) thin films prepared by chemical bath deposition. Journal of Ovonic Research. 2013. No. 9 (1). P. 9–15.
4. Ezenwa I.A. Effects of deposition time on the absorbance of chemical bath deposited CuS thin films. Research Journal of engineering sciences. 2013. No. 2 (1). P. 1–4.
5. Ajaya Kumar Singh. Synthesis of copper sulphide(cus) thin film by chemical bath deposition method and its characterization. Ajaya Kumar Singh, Swati Mehra, Gautam Sheel Thool. European Chemical Bulletin. 2013. No. 2 (8). P. 518–523.
6. Dhondge A.D., Gosavi S.R., Gosavi N.M., Sawant C.P., Patil A.M., Shelke A.R. and Deshpande N.G. Influence of Thickness on the Photosensing Properties of Chemically Synthesized Copper Sulfide Thin Films. World Journal of Condensed Matter Physics, 2015. No. 5. P. 1–9. <http://dx.doi.org/10.4236/wjcmp.2015.51001>.
7. Wu C., Zhang Z., Wu Y., Lv P., Nie B., Luo L., Wang L., Hu J. and Jie J. Flexible CuS Nanotubes-ITO Film Schottky Junction Solar Cells with Enhanced Light Harvesting by Using an Ag Mirror. Nanotechnology, 2013. No. 24, Article ID: 045402. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-4484/24/4/045402>.
8. Peng H., Ma G., Sun K., Mu J., Wang H. and Lei Z. High-Performance Supercapacitor Based on MultiStructural CuS@Polypyrrole Composites Prepared by in Situ Oxidative Polymerization. Journal of Materials Chemistry, 2014. A, 2. P. 303–3307. <http://dx.doi.org/10.1039/c3ta13859c>.
9. Xu J., Zhang J., Yao C., Dong H. and Chil J. Synthesis of Novel Highly Porous CuS Golf Balls by Hydro thermal Method and Their Application in Ammonia Gas Sensing. Journal of the Chilean Chemical Society, 2013. No. 58, P. 1722–1724. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-97072013000200017>.
10. Syamanta K. Goswamia, Jungdong Kim, Kimin Hong, Eunsoon Oh, Yiming Yang, Dong Yu. Photocurrent and photovoltaic characteristics of copper sulfide nanowires grown by a hydrothermal method. Materials Letters, 2014. No. 133. P. 132–134.
11. M. Annie Freeda\*, C.K. Mahadevan. Effect of Zn<sup>2+</sup> doping on CuS nanocrystals. MSiAIJ, 2013. No. 9 (8). P. 283–288.
12. S. Li, H. Z. Wang, Wei Wei Xu, Hong Lei Si, XiaoJun Tao, Shiyun Lou, Zuliang Du, Lin Song Li, Synthesis and assembly of monodisperse spherical Cu<sub>2</sub>S nanocrystals. J. Colloid. Interf. Sci. 2009. Vol. 330. P. 483.
13. A.E. RAEVSKAYA, A.L. STROYUK, S.YA. KUCHMII, A.I. KRYUKOV. Catalytic activity of CuS nanoparticles in hydrosulfide ions air oxidation. J. Mol. Catal. A-Chem. 2004. Vol. 212, P. 259–265.
14. Budiman M.F., Hu W., Igarashi M., Tsukamoto R., Isoda T., Itoh K.M., Yamashita I., Murayama A., Okada Y. and Samukawa S. Control of Optical Bandgap Energy and Optical Absorption Coefficient by Geometric Parameters in Sub-10 nm Silicon-Nanodisc Array Structure. Nanotechnology, 2012. 23, Article ID: 065302.

15. Granovsky A.A. Firefly version 8.1,2014 (<http://classic.chem.msu.su/gran/firefly/index.html>).
16. Bader R.F.W. Atoms in Molecules – A Quantum Theory. Oxford University Press, Oxford. 1990.
17. A.I. Pogoreltsev, V.I. Matuhin, E.V. Gazeeva, E.V. Schmidt, D.A. Shulgin. Investigation of the temperature dependence of the NQR parameters in covellite. Materials Science Forum ISSN: 1662-9752, Vol. 845, pp 69–72 doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.845.69 © 2016 Trans Tech Publications, Switzerland.
18. A.D. Becke and K.E. Edgecombe. A simple measure of electron localization in atomic and molecular systems. J. Chem. Phys. Volume 92, Iss 9, May 1, 1990. P. 5397–5403.
19. Pogorel'cev A.I., Gavrilenko A.N., Matukhin V.L., Korzun B.V., SHmidt E.V. Osobennosti raspredeleniya elektronnoy plotnosti v CuFeS2 po dannym YAMR 63,65Cu v lokal'nom pole, Zhurnal prikladnoy spektroskopii, 2013, Vol. 80., P.361–367.

#### **Authors of the publication**

**Alexander I. Pogoreltsev** – Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Physics

**Vadim L. Matukhin** – dr. Sci.(Phys.-Math.), head. Chair, Department of Physics.

**Olga A. Safonova** – student, department "Relay protection and automation of power systems".

**Aliya R. Sharipova** – student, department "Relay protection and automation of electric power systems".

**Gulchachak N. Islamova** – student, department "Energy supply of enterprises and energy-saving technologies".

**Ekaterina V. Shmidt** – Can. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Chair "Physics".

**Dmitry A. Shulgin** – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Scientific Consultant of the Center for Collective Use "Applied Nanotechnologies".

**Поступила в редакцию**

**30 марта 2018 г.**

УДК 539.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ПЛЕНОЧНОЙ СИСТЕМЫ Pb-SE И ИЗМЕНЕНИЙ ЕЕ СТРУКТУРЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ

А.Г. Разина<sup>1</sup>, В.А. Казаков<sup>2</sup>, А.А. Ашмарин<sup>2</sup>, В.Д. Кочаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,  
г. Чебоксары, Россия

<sup>2</sup>Исследовательский центр имени М.В. Келдыша, г. Москва, Россия

**Резюме:** Методами рентгеновской дифракции и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, электронной оже-спектроскопии исследованы пленочные системы Pb-Se, полученные твердофазным синтезом. Установлено, что пленки являются неоднородными по структуре и составу. Исследованы спектры комбинационного рассеяния света образцов при температурах 300 и 373 К с целью изучения структурных особенностей под действием температуры.

**Ключевые слова:** селенид свинца, пленки, твердофазный синтез, структурный анализ, фазовый переход.

**Благодарности:** Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша».

**DOI:**10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-129-140

## STUDY OF COMPOSITION FILM SYSTEM Pb-SE AND CHANGE OF STRUCTURE UNDER TEMPERATURE ACTION

Alisa G. Razina<sup>1</sup>, Valery A. Kazakov<sup>2</sup>, Artem A. Ashmarin<sup>2</sup>, Valery D. Kochakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary, Russia

<sup>2</sup>Research Center named after M.V. Keldysh », Moscow, Russia

**Abstract:** The Pb-Se film systems were obtained by solid-phase synthesis and investigated by X-ray diffraction and X-ray photoelectron spectroscopy, electron Auger spectroscopy. It was found that the films are heterogeneous in structure and composition. To study the structural features under the influence of temperature, Raman spectra of samples at temperatures of 300 K and 373 K were investigated.

**Keywords:** lead selenide, films, solid-phase synthesis, structural analysis, phase transition.

### Введение

Интерес к исследованию структуры, физических и химических свойств тонких пленок возрос в связи с широкими возможностями их применения в различных областях современной электроники. В зависимости от метода получения пленки различаются по своим характеристикам: качеству нанесенного покрытия, толщине, упаковке молекул, стабильности [1]. В работе исследуются пленочные системы Pb-Se, полученные методом твердофазного синтеза. Технология твердофазного синтеза пленок, основанная на

межслойных химических взаимодействиях, имеет ряд существенных преимуществ: высокая чистота продуктов синтеза, простота аппаратуры, малые энергозатраты и т.д. [2].

В ранее опубликованных нами работах было показано [3; 4], что в исследуемых полупроводниковых пленках наблюдается аномальное изменение сопротивления вблизи температуры  $T_n=343$  К, т.е. полупроводниковая электропроводность переходит в металлическую.

Известно, что в полупроводниковых соединениях группы  $A^{IV}B^{VI}$  возможно наличие фазовых переходов различного характера [5; 6]. Например, при повышении температуры до 800–880 К в SnSe и SnS происходят структурные фазовые переходы 2-го рода в другую орторомбическую структуру — типа ПП, а GeSe переходит в структуру типа NaCl [5]. В работе [7] при исследовании температурной зависимости пленочных толщиной 0,5–1,5 мкм и пресованных образцов двухфазного композита состава PbSe+PbSeO<sub>3</sub> было обнаружено аномальное изменение проводимости при температурах около  $T_n=360$  К. Авторы [7] допускают существование вблизи температуры  $T_n$  фазового перехода, по свойствам близкого к переходу металл-диэлектрик.

Не исключено, что в исследуемых в данной работе пленках Pb-Se при  $T_n$  происходит фазовый переход полупроводник-металл. В связи с этим наиболее целесообразным, как с научной, так и с практической точки зрения, представляется комплексное исследование состава, структуры пленок Pb-Se, полученных методом твердофазного синтеза.

Настоящая работа посвящена описанию результатов экспериментов по исследованию состава образцов, а также установлению связи спектральных характеристик с особенностями их структуры при изменении температуры.

### Методика эксперимента

Двухслойные пленочные системы Pb-Se толщиной 300–400 нм получались на вакуумной установке УВР-3М. Предварительно производилась ионная очистка подложки аргоном, затем методом термического испарения путем последовательного осаждения наносились пленки Pb и Se. В дальнейшем полученные образцы подвергались термическому отжигу в атмосфере азота в вакуумной печи МИМП-ВМ при температуре 250°C в течение 45 минут для перемешивания слоев.

Для изучения состава и структурных особенностей пленок использовались методы рентгеновской дифракции (дифрактометрии), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), электронной оже-спектроскопии (ЭОС), что соответствует разным масштабам точности. Состав и анализ химических связей пленок исследовался методом РФЭС на рентгеновском фотоэлектронном спектрометре *Quantera SXM* фирмы *Physical Electronics*. Измерения проводились в вакууме  $\sim 10^{-7}$  Па. Послойный анализ проводили путем травления образцов пучком ионов аргона  $Ar^+$  с энергией 2 кэВ циклами с длительностью травления 60 с. Скорость ионного распыления  $\sim 0,1$  нм/с. Общие спектры снимались с энергией пропускания анализатора 280 эВ, шаг сканирования 1 эВ. Спектры для линий O1s, Pb4f, Se3d во время послойного анализа снимались при энергии пропускания анализатора 140 эВ и размере шага 0,4 эВ. Необработанные спектры были сглажены с помощью скользящего среднего фильтра (5 итераций), фон корректировался с помощью метода Ширли. Во время послойного анализа съемка проводилась за 1 проход. Пространственное разрешение составляет 100 мкм.

Локальное распределение элементов по глубине зерна образцов исследовали методом ОЭС на оже-спектрометре *RNI-700* путем травления образцов ионами  $Ar^+$  с энергией 2 кэВ с периодической регистрацией оже-электронов. Пространственное разрешение равно 10 нм. При локальном анализе сначала снимались РЭМ-изображения рельефа поверхности образцов, затем выбирались интересующие объекты на поверхности.

Фазовый состав и особенности структуры образцов определяли на рентгеновском  $\theta$ - $\theta$  дифрактометре *PANalytical Empyrean* в медном  $\beta$ -фильтрованном излучении с длиной

волны  $\lambda_{\text{K}\alpha\text{cp}}=(2\lambda_{\text{K}\alpha 1}+\lambda_{\text{K}\alpha 2})/3=1,54184 \text{ \AA}$ . Обработка рентгенограмм проводилась с использованием программы *HighScore Plus* и базы данных *ICDD PDF-4 2015 г.*

Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) образцов снимались на спектрометре *Horiba Jobin Yvon T64000* при температурах 300 и 373 К на воздухе. Для возбуждения спектров использовалось излучение аргонового лазера с длиной волны 512 нм. Мощность падающего на образец излучения равна 60 мкВт.

### Результаты и их обсуждение

При рентгенофазовом анализе образцов были идентифицированы кубическая структура типа NaCl (B1), характерная для кристаллов селенида свинца PbSe, и моноклинная структура, относящаяся к фазе селенита свинца PbSeO<sub>3</sub>. Гало с центром тяжести  $\sim 22^\circ$  по  $2\theta$  вызвано стеклянной подложкой. Дифрактограмма пленочной системы Pb-Se показана на рис. 1.

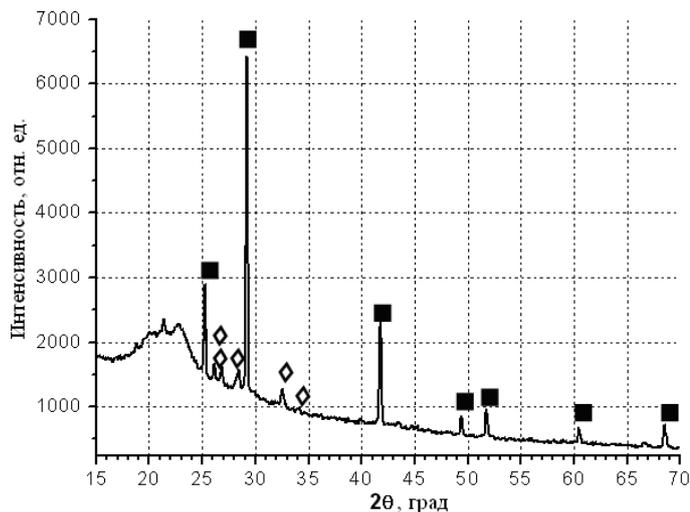


Рис. 1. Дифрактограмма пленочной системы Pb-Se

Состав и особенности структуры фаз пленок Pb-Se по данным РФА приведены в табл. 1. Концентрации присутствующих фаз в пленках были рассчитаны по методу корундовых чисел [8].

Таблица 1

Состав и особенности структуры фаз пленочной системы Pb-Se

Фаза					
Стехиометрическая формула	Название	Сингония	Структура	Обозначение	Сод. масс. %
PbSe	Клаусталит	Куб.	Fm-3m	■	55
PbSeO <sub>3</sub>	Молибдомениит	Монокл.	P21/m	◆	45

По результатам рентгеновских исследований была определена постоянная кристаллической решетки PbSe. В зависимости от концентрации Pb ее значение находится в диапазоне 6,115-6,121 Å, что хорошо согласуется с литературными данными [12].

По результатам анализа РФЭС в поверхностных слоях пленок Pb-Se было обнаружено присутствие следующих элементов: Pb, Se, O, C и Na (рис. 2). При расчете

атомного состава наличие углерода, появление которого в спектре обусловлено большей частью поверхностными загрязнениями, не учитывалось.

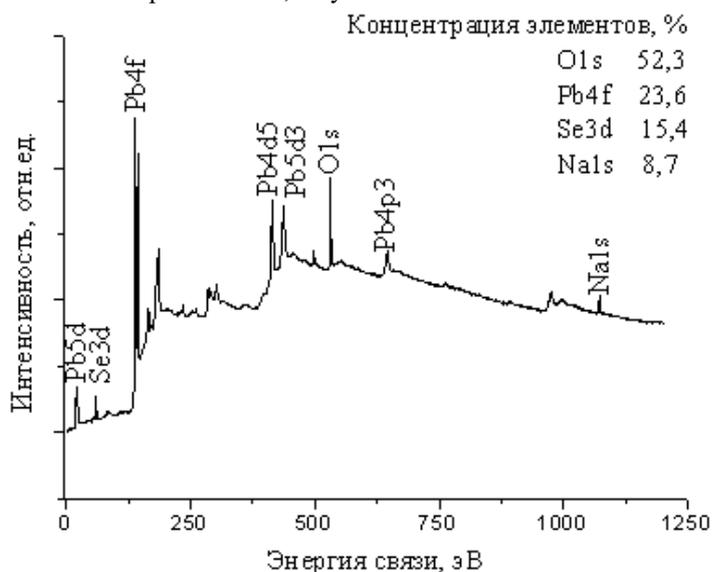


Рис. 2. Рентгеновский фотоэлектронный спектр пленочной системы Pb-Se

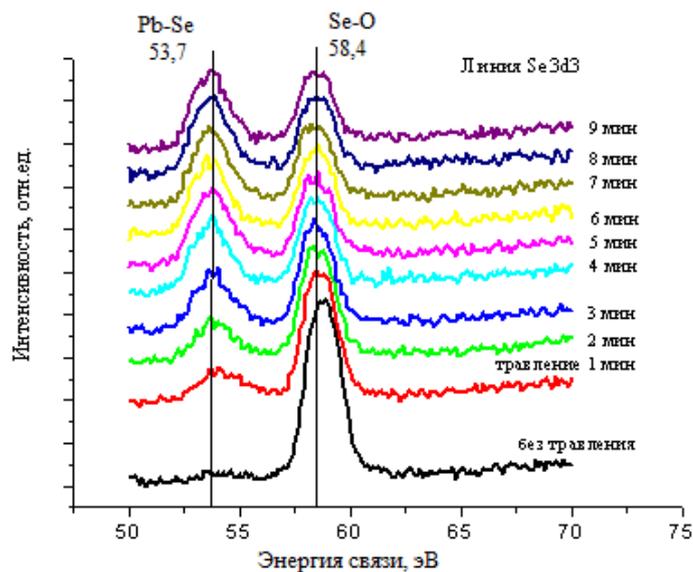
Содержание элементов на поверхности образцов до травления меняется в разных точках в пределах нескольких процентов: свинца (Pb) – (21–27)%, кислорода (O) – (45–55)%, селена (Se) – (15–16)%. Во всех образцах присутствует натрий, появление которого может быть связано с подложкой [9]. Присутствие кислорода в исследуемых пленках объясняется, во-первых, спецификой их синтеза и термообработки, механизм которого не исключает включение кислородсодержащих фаз в объем и поверхностные слои материала. Во-вторых, поверхность PbSe склонна к окислению при хранении на воздухе [10, 11]. Авторами работы [11] выявлено, что во внешней оболочке образцов PbSe при комнатной температуре формируется фаза PbSeO<sub>3</sub>.

Результаты исследования распределения элементов и анализ химических связей по глубине пленочной системы Pb-Se приведены на рис. 3 и 4. Анализ элементного состава при ионном травлении в течение часа (рис. 4) показывает относительную стабилизацию состава, характеризующуюся монотонным уменьшением содержания кислорода и роста содержания свинца начиная с 4 минуты травления (ориентировочная глубина при скорости травления 6 нм/мин составит 24 нм), которая длится до 30 минуты (180 нм). Затем содержание селена в пленке плавно начинает уменьшаться, снижаясь до статистически незначимых величин. Таким образом, послойное ионное травление позволяет определить толщину фазы PbSe при синтезе образца в 250–300 нм.

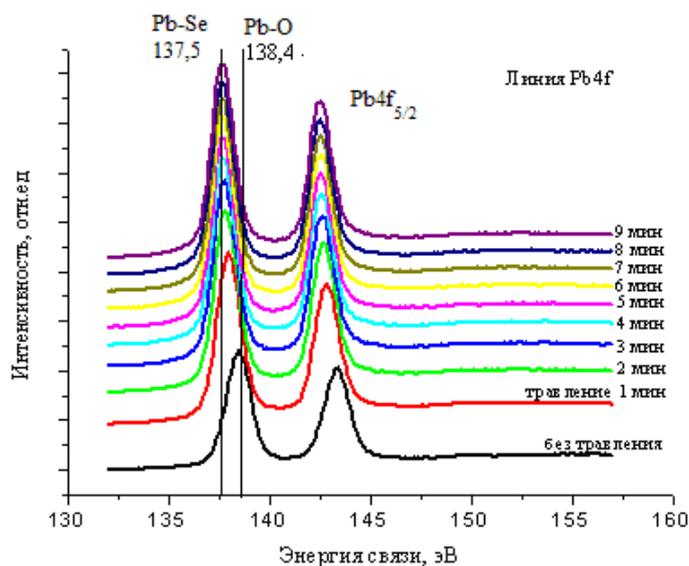
Химическое состояние элементов в поверхностном слое образца Pb-Se определяли по положению линий на РФЭ-спектрах внутренних электронных уровней атомов Pb, Se, O (рис. 3). Анализ химических связей в спектрах высокого разрешения Pb4f и Se3d показал, что Pb и Se в образцах находятся только в связанном состоянии: соединении селенида (PbSe) и селенита (PbSeO<sub>3</sub>) свинца, что говорит о полной реакции между селеном и свинцом при отжиге. Свинец в пленке на поверхности до травления (в слое 1–2 нм) находится в составе оксидных фаз, образуя связи Pb–O. После первого же цикла травления (в течение 60 с) при сохранении оксидной фазы появляется фаза PbSe, которая при дальнейшем травлении растет (рис. 3,б).

Селен в пленке на поверхности также находится в окисленном состоянии, образуя связи Se-O (компонента 58,4, рис. 3,а). К этой же компоненте могут относиться оксидные связи типа  $PbSe_{1-x}O_x$ . Также, как и в случае со свинцом, появляется растущая с течением времени фаза Pb-Se с сохранением оксидной фазы. Рентгеновские фотоэлектронные O1s-спектры пленок (рис. 3,б) содержат две составляющие. Компонента с энергией связи  $\sim 530,5$  эВ принадлежит оксидам свинца, хотя можно предположить и существование твердых растворов замещения Me-Se-O. Компонента с максимумом эн  $\sim 529$  эВ также принадлежит оксидам свинца Pb-O, в котором валентность свинца отличается от его валентного состояния на поверхности пленки Pb-Se-O.

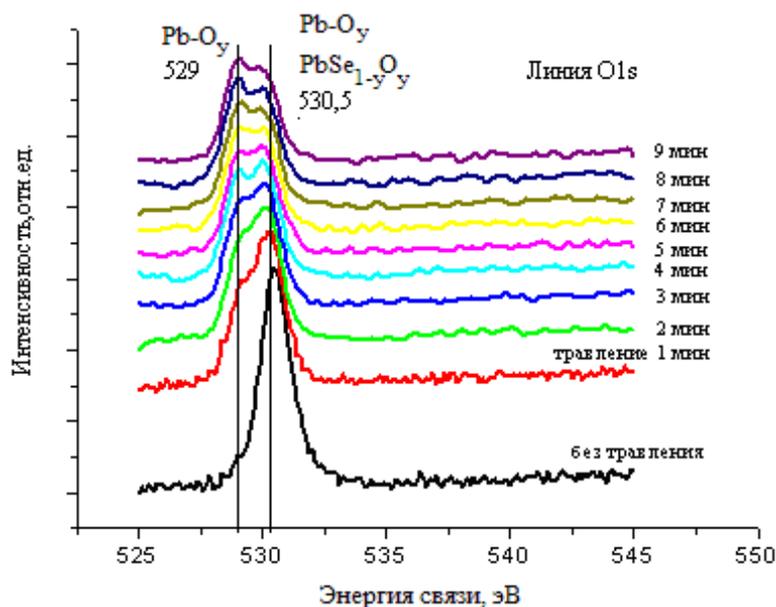
Следует отметить, что в процессе травления могут происходить процессы селективного вытравливания разных фаз пленки, что будет приводить к погрешности при расчете атомного содержания.



а)



б)



в)

Рис. 3. Рентгеновские фотоэлектронные спектры внутренних электронных уровней атомов селена, свинца и кислорода в пленке Pb-Se: (а)  $Se3d3$ , (б)  $Pb4f$ , (в)  $O1s$

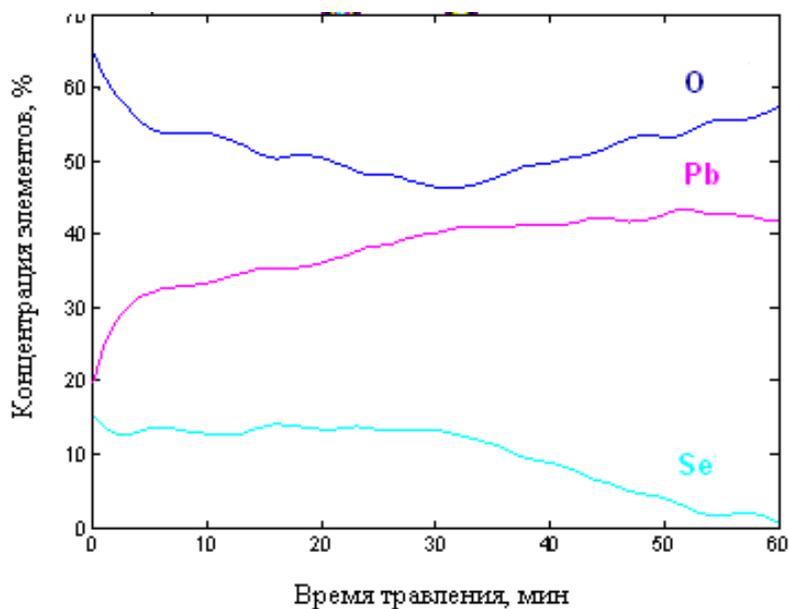
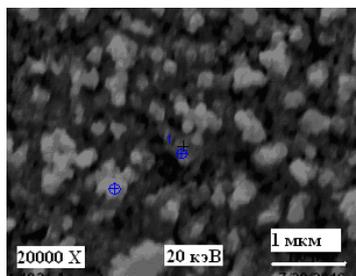


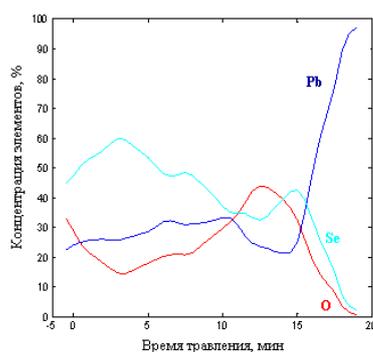
Рис.4. Распределение элементов Se, O, Pb по глубине пленочной системы Pb-Se по данным РФЭС. Скорость травления ~6 нм/мин

Методом ЭОС был проведен локальный элементный анализ пленок Pb-Se в различных точках поверхности. На электронно-микроскопическом изображении (рис. 5,а) показаны точки, в которых проводились исследования элементного состава. Пленка состоит из сросшихся микрокристаллитных образований, частицы которых имеют размер  $0,2 \pm 0,25$

мкм. Анализировался состав шести точек в различных областях образца. Послойное ионное травление в течение 20 мин. методом ЭОС (рис. 5,б) показывает, что содержание селена в отдельных зернах может быть выше. Таким образом, в отдельных точках пленки процентное соотношение концентрации элементов (Pb, Se и O) может отличаться. Возможно, в пленках присутствуют рентгеноаморфные фазы свинца, селена и их окислов.



а)



б)

Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение (а) и распределение элементов Se, O, Pb по глубине (б) пленочной системы Pb-Se по данным ЭОС

Обобщая результаты рентгеновских исследований, укажем, что пленки Pb-Se, полученные методом твердофазного синтеза, являются неоднородными по структуре и составу.

Для получения сведений о причинах необычного поведения электрофизических свойств пленок Pb-Se проведены исследования структуры методом комбинационного рассеяния света при температурах 300 и 373 К.

На рис. 6 показаны спектры комбинационного рассеяния пленки Pb-Se при температурах до и выше точки фазового перехода. При снятии спектров КР для исключения фотоокисления поверхность образцов контролировалась оптическим микроскопом.

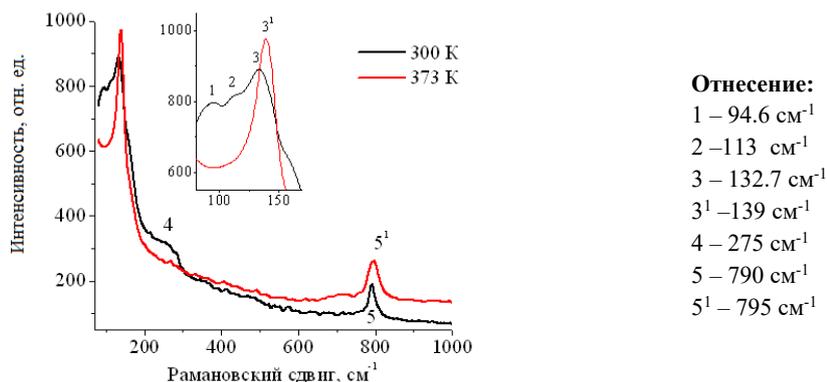


Рис.6. Спектры КРС пленочной системы Pb-Se при температурах 300 и 373 К

Поскольку селенид свинца, как и другие халькогениды, кристаллизуется в гранцентрированной кубической решетке типа структуры NaCl, то он не должен реагировать на рамановское рассеяние первого порядка [13]. Тем не менее, авторы некоторых работ [14–19] достаточно интенсивные полосы КР, наблюдаемые в спектрах, (табл. 2) относят к LO и TO фононам PbSe. Как известно, при наличии точечных дефектов структурное совершенство кристалла ослабляется, вследствие чего становится возможным процесс комбинационного рассеяния света [22].

Из табл. 2 видно, что мнения авторов по идентификации интенсивных полос КР расходятся. Убедительной представляется точка зрения, представленная в работе [20]: пики 94,6; 113; 132,7 и 275 см<sup>-1</sup> в области низких частот спектров пленочной системы Pb-Se при температуре 300 К относятся к оксидным соединениям свинца [20]. По литературным данным [21] эти пики можно связать с колебаниями связей Pb-O. Пик 790 см<sup>-1</sup> относится к колебаниям связи SeO<sub>2</sub> [11].

При повышении температуры до 373 К характер спектра меняется существенно, особенно в области низких частот, относящейся к колебаниям связей Pb-O (для наглядности приведена вставка на рис. 6). Во-первых, полосы 94,6; 113 и 275 см<sup>-1</sup>, практически исчезают, в то время как интенсивность линии при 139 см<sup>-1</sup> наоборот усиливается. Во-вторых, происходит сдвиг колебательных мод 132 на 7 см<sup>-1</sup> и 790 на 5 см<sup>-1</sup> в сторону высоких частот. Такие изменения при нагреве могут быть связаны с изменениями как структурных и динамических характеристик пленок, так и особенностями электронно-колебательных взаимодействий [22]. В связи с этим, возможно, происходят изменения зонных параметров и параметров носителей заряда.

Таблица 2

Отнесение ряда полос в спектре КРС фононным модам материала в работах [8–13]

–	TO, см <sup>-1</sup>	SP	LO, см <sup>-1</sup>	2LO, см <sup>-1</sup>	Полярон PbSe, см <sup>-1</sup>
[9]	86	-	135	270	800
[10]	80	125	136-140	276	-
[11]	-	136	-	-	-
[12]	-	-	138	274	-
[13]	-	-	140	171 (X) 235 (Δ) 280 (Γ)	-
[14]	-	-	136,3	-	796,9

Исследованные пленочные системы Pb-Se толщиной 300–400 нм относятся к тонким пленкам. Как известно, в тонких пленках роль поверхностных слоев, в данном случае слой  $PbSeO_3$ , существенно возрастает [23]. Локализованные состояния, связанные с поверхностью, играют роль, аналогичную примесям и дефектам. С ростом температуры концентрация поверхностных уровней увеличивается, образуется зона энергетических уровней, почти вплотную примыкающая к зоне проводимости. Таким образом, ширина запрещенной зоны существенно уменьшается с ростом температуры. При достижении критической температуры  $T_n=343$  К, по-видимому, уровень Ферми, находящийся в середине запрещенной зоны, будет приходиться на зону проводимости, что характерно для металлов [24]. Следовательно, при температуре  $T_n$  должен произойти фазовый переход полупроводник-металл.

### Выводы

Использованные структурные и спектральные методы анализа позволили получить данные элементного и фазового состава пленок Pb-Se, полученных методом твердофазного синтеза. Методом РФА установлено, что исследуемые образцы в основном содержат две фазы PbSe и  $PbSeO_3$ . Более точные методы РФЭС и ЭОС показывают неоднородность распределения концентраций элементов по глубине пленки, что приводит к образованию дефектов. Выявлено, что при нагревании образцов до 373 К происходит изменение спектральных характеристик, что, вероятно, приводит к изменениям зонных параметров и параметров носителей заряда. Рассмотрен возможный механизм изменения типа проводимости, который авторы связывают с фазовым переходом полупроводник-металл.

### Литература

1. Ulman A. An Introduction on Ultrathin Films, from Langmuir-Blodgett to Self-Assembly // Academic Press: Boston. 1991.
2. Рыбакова А.Н., Жигалов В.С., Мягков В.Г. Особенности химических взаимодействий в двухслойных структурах переходных металлов // Решетневские чтения: материалы XVII Междунар. науч. конф. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2013. Т. 1, № 17. С. 476–477.
3. Краснова А.Г., Кокшина А.В., Белова А.В., Кочаков В.Д. Исследование взаимодействия PbSe с углеродом в состоянии  $sp^1$  // Вестник Чувашского университета. 2012. № 3. С. 46–47.
4. Краснова А.Г. Синтез и исследование тонкопленочной бинарной системы Pb-Se // Сборник материалов I Всеросс. науч. конф. «Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечных элементов 3-го поколения». Чебоксары, 2013. С. 76–77.
5. Лебедев А.И., Случинская И.А. Влияние легирующих примесей на сегнетоэлектрические фазовые переходы в  $PbTe_{1-x}S_x$  и  $Pb_{1-x}Ge_xTe$  // ФТТ. 1993. Т. 35, № 3. С. 629–635.
6. Волков Б.А., Кушнир В.П., Панкратов О.А. Поведение диэлектрической проницаемости полупроводников  $A^4B^6$  при структурных фазовых переходах // ФТТ. 1982. Т. 24, № 2. С. 415–422.
7. Томаев В.В. Мирошкин В.П., Гарькин Л.Н. Влияние технологии изготовления двухфазного композита состава  $PbSe+PbSeO_3$  на его сопротивление // Физика и химия стекла. 2006. Т. 32, № 5. С. 789–793.
8. F. H. Chung. Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures. // J. Appl. Cryst. 1974. V. 7, P. 519–525.
9. Аткарская А.Б., Нарцев В.М., Прохоренков Д.С., Шеманин В.Г. Влияние диффузии натрия из стеклянной подложки на оптические свойства композитов // Научно-технический «Оптический журнал». 2016. Т. 83, № 7. С. 15–19.
10. C. Gautier M., Combon – Muller M., Averous M. Study of PbSe layeroxidation and oxidizedissolution // Appl. Surf. Science. 1999. V. 141, P. 157–163.
11. Томаев В.В., Мазур А.С., Гревцев А.С. Исследование процесса термического окисления селенида свинца методами ЯМР и РФА // Физика и химия стекла. 2017. Т. 43, № 1. С. 99–105.

12. Янг Ю.Д., Ли В. Электроосаждение микро- и нанокристаллического селенида свинца из щелочных селеносульфатных растворов // Электрохимия. 2013. Т. 49, № 4. С. 428–433.
13. Кузиванов М.О., Зимин С.П., Федоров А.В., Баранов А.В. Комбинационное рассеяние света пленками селенида свинца при низких уровнях возбуждения // Оптика и спектроскопия. 2015. Т. 119, № 6. С. 925–930.
14. Nillohit Mukherjee, Sk.F. Ahmed, Swarup Kumar Maji and Anup Mondal Experimental study on electron field emission, Raman scattering, and low temperature electrical properties of nanocrystalline lead selenide thin films // Journal of Applied Physics. 2011. 109. P. 104–312.
15. Yang A.L., Wu H.Z., Li Z.F., Qiu D.J., Chang Y., Li J.F., McCann P.G., Fang X. M. Raman Scattering Study of PbSe Grown on (111) BaF<sub>2</sub> Substrate // Chinese Physics Letters. 2000. V. 17, No. 8. P. 606–608.
16. Manciu F.S., Sahoo Y., Carreto F., Prasad P. N. Size-dependent Raman and infrared studies of PbSe nanoparticles // Journal of Raman Spectroscopy. 2008. V. 39, P. 1135–1140.
17. Huaqiang Cao, Yujiang Xiaob, Renlong Liangab Generation and superhydrophobicity of complex PbSe crystalline nanodendrites // CrystEngComm. 2011. V. 13, P. 5688–5691.
18. Wen-Shiang Chang, Yi-Feng Lin, Bijay Sarkar, Yu-Min Chang, Ling-Kang Liud, C. W. Liu Synthesis and characterization of [Pb{Se<sub>2</sub>P(Oi Pr)<sub>2</sub>}<sub>2</sub>]<sub>n</sub> pseudo polymorphs: Polymeric, single source precursor enabling preparation of shape-controlled lead selenide structures // Dalton Trans. 2010. V. 39, P. 2821–2830.
19. R. Romano-Trujillo, E. Rosendo, M. Ortega, A. Morales-Sanchez, J.M. Gracia, T. Diaz, G. Nieto, G. Garcia, J. A. Luna-Lopez, M. Paciol Synthesis and characterization of PbSe nanoparticles obtained by a colloidal route using Extran as a surfactant at low temperature // Nanotechnology. 2012. V. 23, No. 18. P. 185602.
20. V.N. Sigaev, I. Gregora, P. Pernice, B. Champagnon, E.N. Smelinskaya. A. Aronne, P.D. Sarkisov// Structure of lead germinate glasses by Raman spectroscopy / Journal of Non-Crystalline Solids. 2001. V. 279, No. 2–3. P. 136–144.
21. Войгова В.М., Куликова О.В., Лотарев С.В., Сигаев В.Н., Колташев В.В., Плотниченк В.Г. Исследование стеклообразующих систем PbO-GeO<sub>2</sub> и PbO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> методом спектроскопии КР // Успехи в химии и химической технологии. 2007. Т. 21, № 7 (75). С. 46–49.
22. Крылова С.Н. Комбинационное рассеяние света и фазовые переходы в перовскитоподобных кристаллах Rb<sub>2</sub>KcF<sub>6</sub> и RbMnCl<sub>3</sub>: автореферат дис. ... кандидата физико-математических наук: 01.04.05. Красноярск, 2005. 15 с.
23. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. Москва, 1987. 678 с.
24. Кайданов В.И. Равич Ю.И. Глубокие и резонансные состояния в полупроводниках типа A<sup>IV</sup>B<sup>VI</sup>// УФН. 1985. Т. 145, вып. 1. С. 51–85.

#### Авторы публикации

**Разина Алиса Геннадьевна** – аспирант кафедры прикладной физики и нанотехнологий Чувашского государственного университета им И.Н. Ульянова.

**Казаков Валерий Алексеевич** – науч. сотрудник ГНЦ ФГУП «Исследовательский центр имени М. В. Келдыша».

**Ашмарин Артем Александрович** – канд. техн. наук, инженер ГНЦ ФГУП «Исследовательский центр имени М. В. Келдыша».

**Кочаков Валерий Данилович** – канд. техн. наук, профессор кафедры прикладной физики и нанотехнологий Чувашского государственного университета им И.Н. Ульянова.

## References

1. Ulman A. An Introduction on Ultrathin Films, from Langmuir-Blodgett to Self-Assembly // Academic Press: Boston. 1991.
2. Rybakova A. N., Zhigalov V. S., Myagkov V.G. Characteristics of chemical interactions at two layer structures of transition metals// Materials XVII Intern. Scientific. Conf Reshetnev reading. Krasnoyarsk.V.1. №17. 2013. P. 476-477.
3. Krasnova A. G., Kokshina A.V., Belova A.V., Kochakov V.D. Interaction research PbSe with carbon in condition sp<sup>1</sup>// Vestnik Chuvashskogo Universiteta. 2012. №3. P. 46-47.
4. Krasnova A. G. Synthesis and investigation of a thin-film binary system Pb-Se // Nanostructured materials and converting devices for 3rd generation solar cells. 2013. P. 76-77.
5. Lebedev A.I., Sluchinskaya I.A. Vliyanie legiruyushchikh primesei na segnetoelektricheskie fazovye perekhody v PbTe<sub>1-x</sub>Sx i Pb<sub>1-x</sub>GexTe // FTT. 1993. T.35. №3. S.629-635.
6. Volkov B.A., Kushnir V.P., Pankratov O.A. Povedenie dielektricheskoi pronitsaemosti poluprovodnikov A<sup>4</sup>V<sup>6</sup> pri strukturnykh fazovykh perekhodakh // FTT. 1982. T.24. №2. S.415-422.
7. Tomaev V.V. Miroshkin V.P., Gar'kin L.N. Vliyanie tekhnologii izgotovleniya dvukhfaznogo kompozita sostava PbSe+PbSeO<sub>3</sub> na ego soprotivlenie // Fizika i khimiya stekla. 2006. T.32. №5. S.789-793.
8. F. H. Chung. Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures. // J. Appl. Cryst. 1974. V. 7. P. 519-525.
9. Atkarskaya A.B., Shemanin V.G., Nartsev V.M., Prokhorenkov D.S. How the diffusion of sodium from a glass substrate affects the optical properties of composites// Journal of Optical Technology. 2016. T. 83. №7. P. 400-404.
10. C. Gautier M., Combon - Muller M., Averous M. Study of PbSe layer oxidation and oxide dissolution // Appl. Surf. Science. 1999. V. 141. P. 157-163.
11. Tomaev V.V., Mazur A.S., Grevtsev A.S. A study of the process of thermal oxidation of lead selenide by the NMR and XRD methods // Glass Physics and Chemistry. 2017. T. 43. №1. P. 70-74.
12. Yang Y.J., Li W., Xiao F. Electrodeposition of micro- and nanocrystalline lead selenide from alkaline selenosulfate solutions // Russian Journal of Electrochemistry. 2013. T. 49. №4. P. 381-385.
13. Kuzivanov M.O., Fedorov A.V., Baranov A.V., Zimin S.P. Raman scattering in lead selenide films at a low excitation level // Optics and Spectroscopy. 2015. T. 119. №6. P.938-942.
14. Nillohit Mukherjee, Sk. F. Ahmed, Swarup Kumar Maji and Anup Mondal Experimental study on electron field emission, Raman scattering, and low temperature electrical properties of nanocrystalline lead selenide thin films // Journal of Applied Physics. 2011. 109. P.104312.
15. Yang A.L., Wu H.Z., Li Z.F., Qiu D.J., Chang Y., Li J.F., McCann P.G., Fang X. M. Raman Scattering Study of PbSe Grown on (111) BaF<sub>2</sub> Substrate // Chinese Physics Letters. 2000. V.17. №8. P.606-608.
16. Manciu F.S., Sahoo Y., Carreto F., Prasad P. N. Size-dependent Raman and infrared studies of PbSe nanoparticles // Jurnal of Raman Spectroscopy. 2008. V.39. P.1135-1140.
17. Huaqiang Cao, Yujiang Xiaoab, Renlong Liangab Generation and superhydrophobicity of complex PbSe crystalline nanodendrites // CrystEngComm, 2011. V.13. P.5688-5691.
18. Wen-Shiang Chang, Yi-Feng Lin, Bijay Sarkar, Yu-Min Chang, Ling-Kang Liud, C. W. Liu Synthesis and characterization of [Pb{Se<sub>2</sub>P(Oi Pr)<sub>2</sub>}<sub>2</sub>]<sub>n</sub> pseudo polymorphs: Polymeric, single source precursor enabling preparation of shape-controlled lead selenide structures // Dalton Trans. 2010. V. 39. P. 2821-2830.
19. R. Romano-Trujillo , E. Rosendo , M. Ortega , A. Morales-Sanchez , J.M. Gracia , T. Diaz, G. Nieto, G. Garcia, J. A. Luna-Lopez, M. Pacio1 Synthesis and characterization of PbSe nanoparticles obtained by a colloidal route using Extran as a surfactant at low temperature // Nanotechnology. 2012. V. 23. №18. P. 185602.
20. V.N. Sigaev, I. Gregora, P. Pernice, B. Champagnon, E.N. Smelinskaya. A. Aronne, P.D. Sarkisov// Structure of lead germinate glasses by Raman spectroscopy / Journal of Non-Crystalline Solids. 279. 2001. №2-3. P. 136-144.

21. Voytova V.M., Kulikova O.V., Lotarev S.V., Sigaev V.N., Koltashev VV, Plotnichenk V.G. Investigation of glass-forming systems PbO-GeO<sub>2</sub> and PbO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by Raman spectroscopy // Journal Advances in Chemistry and Chemical Technology. 2007. V.21. №7 (75). P. 46-49.

22. Krylova S.N. Kombinatsionnoe rasseyaniye sveta i fazovye perekhody v perovskitopodobnykh kristallakh Rb<sub>2</sub>KcF<sub>6</sub> i RbMnCl<sub>3</sub>: afofererat dis. ... kandidata fiziko-matematicheskikh nauk: 01.04.05.-Krasnoyarsk, 2005.- 15 s.

23. Bonch-Bruevich V.L., Kalashnikov S.G. Fizika poluprovodnikov – Moskva, 1987. – 678 s.

24. Kaidanov V.I. Ravich Yu.I. Glubokie i rezonansnye sostoyaniya v poluprovodnikakh tipa A<sup>IV</sup>B<sup>VI</sup> // UFN. 1985. T.145. V.1. S. 51-85.

#### **Authors of the publication**

**Alisa G. Razina** – post-graduate student, Department of Applied Physics and Nanotechnology Chair, Chuvash State University.

**Valery A. Kazakov** – Researcher of Research Center named after M. V. Keldysh.

**Artem A. Ashmarin** – cand. sci. (techn.), Engineer of Research Center named after M. V. Keldysh.

**Valery D. Kochakov** –cand. sci. (techn.), associateprofessor, Department of Applied Physics and Nanotechnology Chair, Chuvash State University.

**Поступила в редакцию**

**24 мая 2018 г.**

УДК 536

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ И АКУСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПУЛЬСАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В УСТРОЙСТВЕ ТИПА РЕЗОНАТОРА ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Е.В. Семенова<sup>1</sup>, В.М. Ларионов<sup>1</sup>, Ю.В. Ваньков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

<sup>2</sup> Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

evgeniya.yallina@gmail.com

**Резюме:** Одним из перспективных приложений пульсационного горения является утилизация промышленных отходов. Имеется математическая модель и результаты расчета частоты и амплитуды акустических колебаний газа в устройстве типа резонатора Гельмгольца, использующем твердое топливо. В данной работе пульсационное горение рассматривается как результат взаимодействия акустических колебаний с процессом тепловыделения в зоне горения. Показано, что частота и амплитуда колебаний газа, амплитуда и фаза пульсаций скорости тепловыделения, акустическая энергия, генерируемая в зоне горения, – есть взаимосвязанные величины.

**Ключевые слова:** пульсационное горение, твердое топливо, термодинамические характеристики, параметры колебаний.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-141-147

## THERMODYNAMIC AND ACOUSTIC ANALYSIS OF THE SOLID FUEL PULSATING COMBUSTION IN A HELMHOLTZ RESONATOR TYPE DEVICE

E.V. Semenova<sup>1</sup>, V.M. Larionov, Yu.V. Vankov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kazan Federal University, Kazan, Russia

<sup>2</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

evgeniya.yallina@gmail.com

**Abstract:** One of the perspective applications of pulsating combustion is the utilization of industrial waste. There is a mathematical model and the results of calculating the frequency and amplitude of acoustic gas oscillations in a Helmholtz resonator type device using solid fuel. In this paper, pulsating combustion is considered as a result of the interaction of acoustic oscillations with the process of heat release in the combustion zone. It is shown that the frequency and amplitude of gas oscillations, the amplitude and phase of the heat release rate pulsations, the acoustic energy generated in the combustion zone are interrelated quantities.

**Keywords:** pulsation combustion, solid fuel, thermodynamic characteristics, vibration parameters

### Введение

Одним из перспективных приложений пульсационного горения является

утилизация промышленных отходов [1–9]. В работах [11–13] была разработана математическая модель пульсационного горения в установке типа резонатора Гельмгольца, состоящей из камеры сгорания, в которой происходит сжатие и разрежение газа, и двух резонансных труб, в которых газ совершает колебательное движение. Были проведены расчеты условий возбуждения, частоты и амплитуды колебаний газа. Однако термодинамическая составляющая процесса пульсационного горения осталась неизученной. Целью данной работы является анализ пульсационного горения как процесса взаимодействия акустических колебаний газа с тепловым источником, расположенным в камере сгорания рассматриваемой установки. Будут рассчитаны акустические параметры: частота и амплитуда колебаний газа и соответствующие термодинамические параметры: пульсации скорости тепловыделения и акустическая энергия, получаемая газом в единицу времени, которая равна работе, совершаемой над газом в результате периодического подвода теплоты.

### Базовые соотношения

Схема исследуемой установки показана на рис. 1.

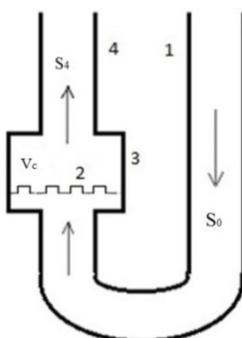


Рис. 1. Принципиальная схема установки

1 – воздухоподающая труба; 2 – решётка, удерживающая топливо;  
3 – камера сгорания; 4 – труба для выхода продуктов сгорания

Далее приводятся известные соотношения [10], которые будут использованы в данной работе. Уравнение энергетического баланса имеет вид:

$$A_{c,N} = A_{d,N} = A_{w,0} + A_{i,0} + A_{w,4} + A_{i,4}. \quad (1)$$

Акустическая энергия  $A_{c,N}$ , получаемая газом в зоне горения за единицу времени, потери акустической энергии на стенках воздухоподающей трубы  $A_{w,0}$ , потери, вызванные излучением звука из воздухоподающей трубы  $A_{i,0}$ , потери акустической энергии в трубе для выхода продуктов сгорания  $A_{w,4}$ ,  $A_{i,4}$  определяются соотношениями:

$$A_c = (a_{c,L} - a_{c,N} p_c) p_c^2, \quad A_{w,0} = a_{w,0} p_c^2, \quad A_{i,0} = (a_{0,L} + a_{0,N} p_c) p_c^2, \quad (2)$$

$$A_{w,4} = a_{w,4} p_c^2, \quad A_{i,4} = (a_{4,L} + a_{4,N} p_c) p_c^2. \quad (3)$$

Коэффициенты, входящие в соотношения (2), (3), связывающие акустические энергии с амплитудой пульсаций давления в зоне горения, находятся по известной методике.

Пульсации давления газа и скорости тепловыделения в камере сгорания имеют вид:

$$\text{Re } p' = p_c \cos \omega t, \quad \text{Re } q' = q \sin(\omega \tau_u - \omega t).$$

Частоты колебаний газа находятся из общего уравнения [11], соответствующего установкам рассматриваемого типа:

$$\frac{b_4}{2\omega} + \beta_4 \operatorname{tg} \phi_4 + F_0^{-1} = 0,$$

$$F_0 = \left( \frac{\omega V_c - \varepsilon_0}{c_1 S_c - \bar{Y}_0} \right) \frac{c_1}{c_{4,0}}, \quad \varepsilon_0 = \frac{S_0}{S_c}, \quad \bar{Y}_0 = \frac{Y_0}{\rho_{1,0} c_1},$$

где  $b_4$  – градиент скорости звука в трубе для выхода продуктов сгорания;  $\beta_4 = \sqrt{1 - (b_4/2\omega)^2}$ ;  $\phi_4$  – фазовый угол, соответствующий открытому концу трубы;  $Y_0$  – импеданс воздухоподающей трубы.

Подставляя соотношения (2), (3) в уравнение (1), получим формулы:

$$p_c = \frac{a_{c,L} - a_{w,1} - a_{w,3} - a_{w,4} - a_{1,L} - a_{3,L} - a_{4,L}}{a_{c,N} + a_{1,N} + a_{3,N} + a_{4,N}};$$

$$I_c = 20 \log(10^5 p_c / 2),$$

определяющие амплитуду установившихся колебаний давления в зоне горения и соответствующий уровень звукового давления  $I_c$ .

### Результаты

Расчет проводился применительно к горению древесных кубиков с длиной ребра 1 см. Известно, что за 5 минут происходит практически полное сгорание 8 кубиков. Вычисления показывают, что в этом случае средняя тепловая мощность процесса горения равна 310 Вт. Исходные данные, необходимые для расчета пульсационного режима горения, были заимствованы из предшествующих работ [11; 13]. Как известно [12], акустическая энергия, получаемая газом в зоне горения, прямо пропорциональна  $\sin(\omega t_u)$  и обратно пропорциональна мнимой части акустического импеданса воздухоподающей трубы  $Y_0$ . В табл. 1 приведены результаты расчета частоты и амплитуды колебаний газа, амплитуды пульсаций скорости тепловыделения, средней за период колебаний акустической энергии, получаемой газом в зоне горения за единицу времени, и фазового сдвига  $\omega t_u$  между пульсациями скорости тепловыделения и пульсациями скорости воздуха, поступающего в камеру сгорания.

Таблица 1

Акустические и термодинамические параметры пульсационного горения

$f$ , Гц	$p_c$ , Па	$\omega t_u$	$l_0$ , м	$Y_0$ , Па·с/м	$q$ , Вт	$A_c$ , Вт	Частота
64	1685	1,31	1,2	2847	149	0,35	первая
156	144	2,15	1,2	145	49	0,01	вторая
67	1843	1,35	3,6	1579	224	0,57	вторая

Анализ показал, что  $A_c > 0$ , если при  $Y_0 > 0$  фазовый сдвиг  $\omega t_u$  изменяется от 0 до  $\pi$ , а при  $Y_0 < 0$  – от  $\pi$  до  $2\pi$ . Согласно табл. 1 при  $l_0 = 1,2$  м для первой и второй частоты колебаний  $Y_0 > 0$ , а фазовый сдвиг  $\omega t_u$  равен 1,31 и 2,15 соответственно, что удовлетворяет условию возбуждения колебаний. Однако акустическая энергия, получаемая газом в случае колебаний с первой частотой, значительно превышает энергию, соответствующую колебаниям со второй частотой. Поэтому реально будут наблюдаться колебания с первой частотой. Для воздухоподающей трубы длиной  $l_0 = 3,6$  м фазовый сдвиг  $\omega t_u$  становится настолько малым, что получаемая газом акустическая энергия меньше ее потерь и колебания с первой частотой не возбуждаются. Вторая частота колебаний понижается настолько, что  $\omega t_u = 1,35$ , что близко к оптимальному значению  $\pi/2$ . При этом амплитуда пульсаций скорости тепловыделения и получаемая газом акустическая энергия даже превышают значения, соответствующие колебаниям с

первой частотой, при  $l_0 = 1,2$  м. Аналогичные расчеты были выполнены для колебаний, параметры которых показаны на рис. 2.

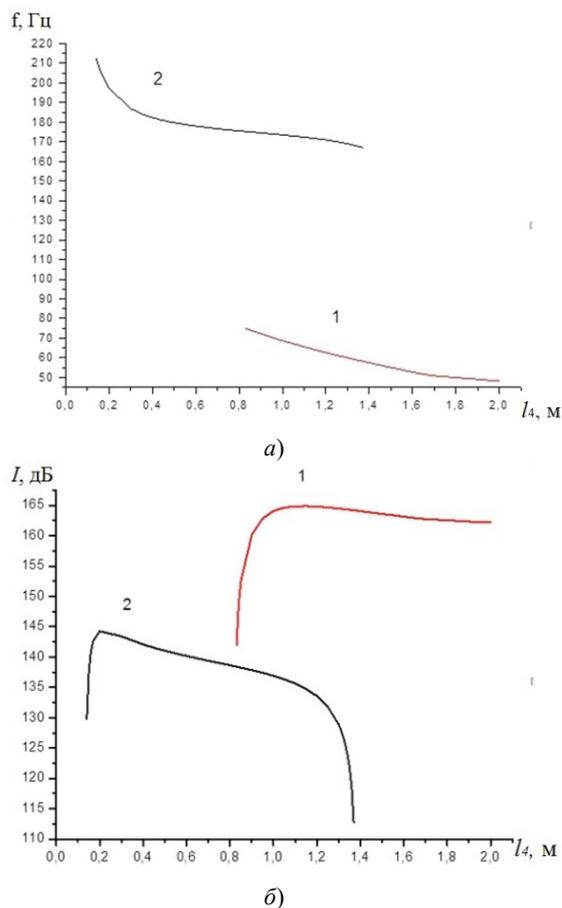


Рис. 2. Зависимости частоты (а) и уровня звукового давления (б) от длины резонансной трубы при фиксированной длине трубы для выхода продуктов сгорания  $l_0=1,07$  м и  $R_f=0,015$  м,  $R_0=0,02$  м,  $l_c=0,14$  м,  $R_c=0,05$  м

Вычисления показали, что при  $l_4 = 0,2$  м для колебаний с первой частотой (кривая 1)  $Y_0 < 0$ , то есть пульсационное горение возникает, если  $\pi < \omega_1 \tau_{ii} < 2\pi$ . Однако, колебания не возбуждаются, так как  $\omega_1 \tau_{ii} = 1,93$ . Для второй частоты (кривая 2)  $\omega_2 \tau_{ii} = 2,44$ , но поскольку  $Y_0 > 0$ , условие возбуждения колебаний  $0 < \omega_2 \tau_{ii} < \pi$  выполняется. Амплитуда пульсаций скорости тепловыделения и получаемая газом акустическая энергия таковы, что в камере сгорания устанавливается режим с амплитудой пульсаций давления в зоне горения 219 Па. В случае  $l_4 = 1,1$  м для обеих частот  $Y_0 > 0$  и условие возбуждения колебаний газа выполняется, так как  $\omega_1 \tau_{ii}$  и  $\omega_2 \tau_{ii}$  находятся в интервале от 0 до  $\pi$ .

Однако амплитуда пульсаций скорости тепловыделения и получаемая газом акустическая энергия в случае первой частоты значительно превосходят значения, соответствующие второй частоте. Поэтому реально пульсационное горение будет сопровождаться колебаниями газа с первой частотой. При  $l_4 = 1,6$  м для колебаний со второй частотой  $Y_0 < 0$ . Так как  $\omega_2 \tau_{ii}$  меньше  $\pi$ , газ не получает акустическую энергию ( $A_c < 0$ ) и такие колебания не возникли.

Термодинамические характеристики пульсационного горения

$f$ , Гц	$p_c$ , Па	$\omega\tau_u$	$l_4$ , м	$Y_0$ , Па·с/м	$q$ , Вт	$A_c$ , Вт	Частота
127		1.93	0.2	-300		<0	первая
197	219	2.44	0.2	410	25	0.007	вторая
66	2614	1.33	1.1	1523	251	0.911	первая
172	80	2.27	1.1	120	39	0.004	вторая
53	2257	1.15	1.6	728	189	0.590	первая
152		2.12	1.6	-57		<0	вторая

Для первой частоты  $Y_0 > 0$ ,  $\omega_1\tau_u < \pi$ , что соответствует условию возбуждения колебаний. Амплитуда пульсаций скорости тепловыделения и величина получаемой газом акустической энергии таковы, что становится возможным возбуждение колебания газа с частотой 53 Гц и амплитудой колебаний давления в зоне горения 2257 Па. Отметим, что максимальная величина 2614 Па (УЗД в камере сгорания 160 дБ) наблюдается при  $l_4 = 1,1$  м, когда амплитуда пульсаций скорости тепловыделения достигает 0,8 среднего значения 310 Вт, фазовый сдвиг  $\omega_1\tau_u$  близок к оптимальной величине  $\pi/2$ , а получаемая газом в единицу времени акустическая энергия порядка 1 Вт.

Для условий, соответствующих результатам расчета при  $l_0 = 3,6$  м, был проведен анализ пульсаций давления в зоне горения и пульсаций скорости тепловыделения в течение одного цикла (рис. 3).

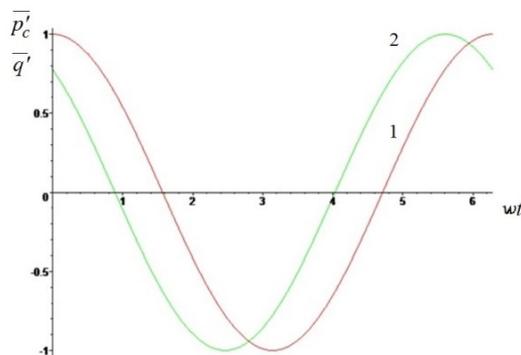


Рис. 3. Сравнение пульсаций давления (1) в зоне горения и скорости тепловыделения (2)

Использовались безразмерные величины:  $\overline{p'_c} = p'_c / p_c = \cos \omega t$ ,

$\overline{q'} = q' / q = \sin(\omega\tau_u - \omega t)$ . Видно, что в рассматриваемом случае режим пульсационного горения наблюдается при выполнении общего термодинамического условия Рэлея: если фазовый сдвиг между колебаниями давления и колебаниями скорости теплоподвода по абсолютному значению меньше  $\pi/2$ , колебания возбуждаются; если фазовый сдвиг лежит в пределах от  $\pi/2$  до  $\pi$ , колебания гасятся.

### Заключение

Установлено, что при пульсационном горении твердого топлива в установке типа резонатора Гельмгольца амплитуда пульсаций скорости тепловыделения достигает 0,8 среднего значения тепловой мощности камеры сгорания 310 Вт, а уровень звукового давления в камере сгорания достигает 160 дБ. Характерно, что в таком режиме газ в зоне

горения в единицу времени получает небольшое количество акустической энергии – порядка 1 Вт.

#### **Литература**

1. Carvalho J.A. Behavior of solid particles in pulsating flows // Sound and Vibration. 1995. Vol. 185. P. 581–593.
2. Таймаров М.А., Шарипов М.Р. Котёл пульсирующего горения природных и пиролизных газов // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Том 16, № 21. С. 133–135.
3. Бида Л.А., Гешеле В.Д., Левчук А.С., Плещанков И.Г., Полежаев, Ю.В., Раскатов И.П., Соловьев В.Н., Фокина Г.И. Вибрационное горение как перспектива утилизации загрязненного радиоцезием древесного топлива // Инженерно-физический журнал. 2013. № 1. С. 145–151 .
4. Бокун И.А. Сжигание низкосортных топлив и биомассы в пульсирующем слое // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2013. № 6. С. 58–64.
5. Филипов С.Е., Ларионов В.М. Вибрационное горение твердого топлива в устройстве типа «емкость–труба» // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2004. № 1–2. С. 135–138.
6. Novozhilov B.V. Linear analysis of hotspot-pulsating mode of propellant combustion / B.V. Novozhilov // Russian journal of physical chemistry. 2015. № 1 (9). P. 43–49.
7. Бобровицкий С.А. Повышение устойчивости процессов горения в камере сгорания ГТД за счет конструктивных доработок камеры сгорания // Инновационные процессы в современном мире (ИННОФОРУМ-2016). Ростов: Фонд науки и образования, 2016. С. 331–332.
8. Егоров М.Ю., Егоров С.М., Егоров Д.М., Мормуль Р.В. Численное моделирование нестационарных и нелинейных внутрикамерных процессов при срабатывании ракетного двигателя на твердом топливе специального назначения Часть 2. Результаты расчетов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2017. № 48. С. 26–34.
9. Аскарлова А.С., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Нугманова А.О., Ергалиева А.Б. Численное исследование температурных характеристик камеры сгорания реального энергетического объекта БКЗ 160 // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. 2014. № 16. С. 158–162.
10. Белодед О.В., Филипов С.Е. Расчет вибрационного горения в резонаторе Гельмгольца энергетическим методом // IV НПК молодых ученых и специалистов РТ. Казань, 2001. С. 56.
11. Ларионов В.М. Вибрационное горение в энергетических установках типа «емкость–труба» / В.М. Ларионов, С.Е. Филипов, О.В. Белодед // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2003. № 11–12. С. 64–71.
12. Ларионов В.М., Филипов С.Е., Рукавишников Д.В. Механизмы возбуждения и теоретическая модель вибрационного горения твердого топлива в трубе // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2006. № 1–2. С. 20–28.
13. Larionov V.M., Saifullin E.R., Semenova E.V. Self-excited gas oscillations in Helmholtz resonator type combustor (2016) Journal of Physics: Conference Series, 669 (1).

#### **Авторы публикации**

**Семенова Евгения Вячеславовна** – аспирант Казанского (Приволжского) федерального университета.

**Ларионов Виктор Михайлович** – д-р техн. наук, профессор Казанского (Приволжского) федерального университета.

**Ваньков Юрий Витальевич** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

### References

1. Carvalho J.A. Behavior of solid particles in pulsating flows // Sound and Vibration. 1995. Vol. 185. P.581–593.
2. Taimarov M. A., Sharipov M. R. pulsed combustion Boiler of natural and pyrolysis gases. Bulletin of Kazan technological University. - 2013. - volume 16 ,21 . - Pp. 133-135.
3. Bida, L. A., Comes, V. D., Levchuk, A. S., Pleshakov, I. G., Polezhaev, Y. V., Roll, I. P., Soloviev, V. N., Fokina, G. I. Vibrating combustion as the prospect of recycling of radiocesium-contaminated wood fuels // journal of Engineering physics. - 2013. - №№ 1. - P. 145-151 .
4. Bokun I. A. Burning low-grade fuels and biomass in pulsating layer // Izv. Higher education institutions and energy associations of the CIS. Energy. - 2013. - №6. - P. 58-64.
5. Filipov S.E. Vibration combustion of solid fuel in a device of the "capacitance-tube" type / S.E. Filipov, V.M. Larionov // Izv. Higher education: Problems of energy. -2004. - № 1-2. - P. 135-138.
6. Novozhilov B. V. Linear analysis of hotspot-pulsating mode of propellant combustion / B. V. Novozhilov // Russian journal of physical chemistry 2015 - №1 (9) P. 43-49
7. Bobrovitsky S. A. increasing the stability of combustion processes in the combustion chamber of the gas turbine engine due to the design improvements of the combustion chamber // Innovative processes in the modern world (INNOFORUM-2016). - Rostov: science and education Fund, 2016. - P. 331-332.
8. Egorov M. Yu., Egorov S. M., Egorov D. M., Mormul R. V. Numerical simulation of non-stationary and nonlinear in-chamber processes in the operation of a rocket engine on solid fuel for special purposes Part 2. Results // Bulletin of Perm national research Polytechnic University aerospace. - 2017. - №48. - P. 26-34.
9. Askarova A. S., Bolegenova S. A., Maksimov V. Yu., Nugmanova A. O., ergalieva A. B. Numerical study of temperature characteristics of the combustion chamber of the real energy object BKZ 160 // Fundamental and applied research: problems and results. - 2014. - №16. - P. 158-162.
10. Beloded O. V., Filipov S. E. calculation of vibration combustion in the Helmholtz resonator by the energy method // IV NPK of young scientists and specialists of RT. Kazan: 2001. - P. 56.
11. Larionov V.M. Vibration combustion in power plants of the "capacitance-tube" type / V.M. Larionov, S.E. Filipov, O.V. Beloded, "Izv. Higher education: Problems of energy. - 2003. - No. 11-12. - P. 64-71.
12. Larionov V.M. Excitation mechanisms and theoretical model of vibrational combustion of solid fuel in a pipe. Larionov, S.E. Filipov, D.V. Rukavishnikov // Izv. Vuzov: Problems of power engineering, 2006. - №1-2. from. 20-28.
13. Larionov V.M., Saifullin E.R., Semenova E.V. Self-excited gas oscillations in Helmholtz resonator type combustor (2016) Journal of Physics: Conference Series, 669 (1), статья № 012047.

### Authors of the publication

*Evgenia S. Vyacheslavovna* – post graduate Kazan Federal University.

*Viktor L. Mihailovich* – professor Kazan Federal University.

*Yuriy V. Vitalevich* – professor Kazan State Power Engineering University

*Поступила в редакцию*

*18 мая 2018 г.*