УДК 621.315.17 DOI 10.18635/2071-2219-2018-3-5-7

Разработка и испытание комбинированных стеклопластиковых опор ЛЭП в суровых климатических условиях

Ю. Ю. Федоров,
Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник

С. В. Васильев,
Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск,
младший научный сотрудник

Разработана конструкция стойки опоры ЛЭП из стеклопластикового профиля типа швеллер и деревянного бруса с болтовыми соединениями. Деформационно-прочностные испытания стоек опор длиной 12 м проведены на специально разработанном стенде, на котором имитируются закрепление в грунт и изгиб при эксплуатационных нагрузках с амплитудой до 1,5 м с фиксацией усилий и перемещений. Результаты стендовых испытаний показали достаточную прочность разработанной конструкции. Эксплуатационные испытания проводятся в суровых климатических условиях.

Ключевые слова: *опора ЛЭП, стеклопластик, швеллер, прогиб, изгиб.*

Практика многолетней эксплуатации деревянных опор в районах с резко континентальным и арктическим климатом показывает их недостаточную надежность и долговечность. Используемая древесина подвержена биокоррозии, поскольку жизнедеятельность микроорганизмов, вызывающих гниение древесины, продолжается и при низких температурах. При этом даже незначительное снижение прочности с учетом ветровой нагрузки может привести к разрушению опор. Возможности обеспечения повышенного запаса прочности за счет использования древесины с увеличенным диаметром весьма ограниченны. Одним из наиболее перспективных направлений повышения надежности и долговечности опор воздушных ЛЭП является использование в конструкциях полимерных армированных композитов – стекло-, базальто- и углепластиков, отличающихся достаточной прочностью и низким удельным весом по сравнению с металлами и железобетоном [1, 2].

Из перечисленных композитов наиболее целесообразным является использование в качестве конструкционного материала стеклопластика. Результаты исследований климатической стойкости стеклопластиков в суровых климатических условиях, в том числе в качестве элементов электроизоляторов, показали возможность их продолжительной эксплуатации при воздействии статических и динамических нагрузок. Двухлетние испытания эксплуатационной стойкости опор ЛЭП 110 кВ (производитель Polycomtec, Канада) в г. Якутске также подтверждают перспективность выбора стеклопластика для сооружения опор в экстремальных рабочих условиях.

Несмотря на некоторые преимущества базальтопластиков перед стеклопластиками по механическим свойствам и стойкости к воздействию агрессивных сред, их стойкость в условиях холодного климата ранее практически не исследовалась. Также отсутствуют сведения о стойкости базальтопластиков к воздействию электромагнитного поля. Широкое применение углепластиков в гражданском строительстве в настоящее время не практикуется из-за их высокой стоимости. Имеется достаточное разнообразие разработанных конструкций стеклопластиковых опор воздушных ЛЭП, однако в связи со сложностями конструкций и технологическими проблемами, производителями предлагается довольно ограниченный ассортимент конструктивных вариантов исполнения опор. Кроме того, действующей нормативно-технической документацией, например ПУЭ-7 издания, применение армированных композитов (стеклопластиков) для изготовления опор воздушных ЛЭП не предусматривается, что является серьезным препятствием для возможности их массового применения. В зарубежной практике подобные ограничения хотя и отсутствуют, но широкое внедрение стеклопластиковых опор ЛЭП началось только в последнее десятилетие [1–6].

В Институте проблем нефти и газа СО РАН разработана конструкция комбинированной опоры для ЛЭП до 10 кВ из стеклопластиковых пултрузионных швеллеров и деревянной стойки (рис. 1). При разработке конструкции были применены стеклопластиковые пултрузионные профили АпАТэК-СППС (производитель НПП «АпАТэК», г. Дубна), обладающие морозостойкостью в соответствии с ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости» при температуре −60 °С, что означает возможность их использования в условиях холодного и очень холодного климата. Для придания таких свойств, как стойкость к

ультрафиолету, используются светостабилизаторы класса бензотриазола; для повышения уровня огнестойкости для связующих применяют дисперсные наполнители. Длина опоры составляет 12,5 м; высота над уровнем земли составляет 9,5 м при глубине котлована 3 м. В опоре деревянный брус расположен между швеллерами и закреплен болтами [5].

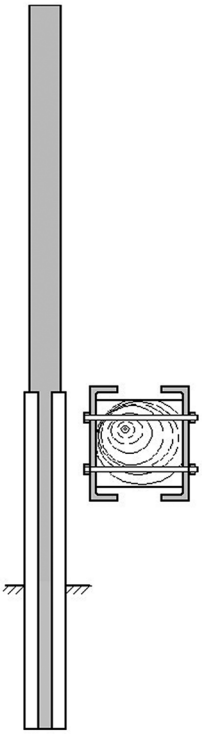


Рис. 1. Конструкция комбинированной стеклопластиковой опоры

Для определения нагрузок [7], которые необходимо обеспечить при проведении стендовых испытаний конструкций опор ЛЭП, руководствовались, в частности, ПУЭ-7 и СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*». Промежуточные опоры в нормальном режиме работы воздушной линии должны быть рассчитаны на сочетание нагрузок согласно ПУЭ-7, одновременное воздействие поперечной ветровой нагрузки на провода (свободные или покрытые гололедом) и на конструкцию опоры.

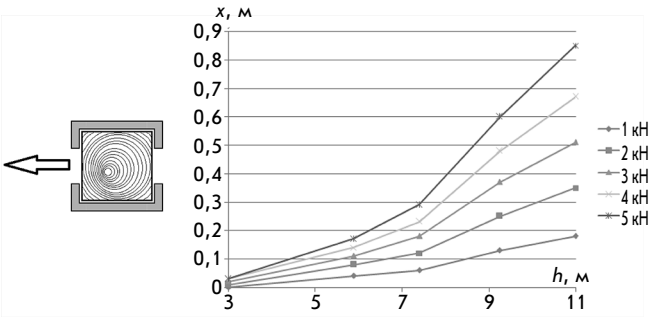
Расчеты показали, что при проведении стендовых испытаний для стеклопластиковой опоры необходимо создать следующие имитационные условия нагружения:

– усилие натяжения троса лебедки в стендовых испытаниях $F' = 5525$ Н $\approx 5{,}5$ кН;

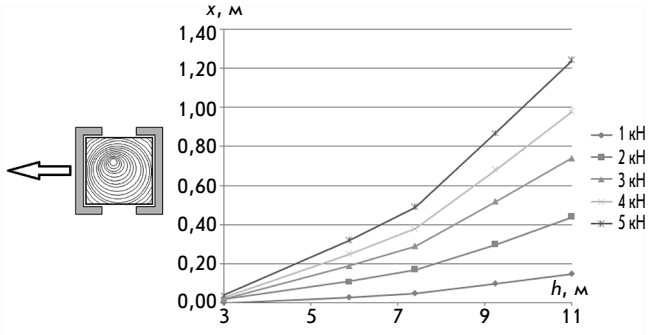
– угол приложения нагрузки к тросу лебедки $\alpha \approx 40°$.

Для проведения стендовых испытаний была изготовлена стойка опоры с имитацией загнивания деревянной части стойки на уровне поверхности грунта, то есть состоящая из 3-метровой части и 9,5-метровой части. Испытания проводили, прикладывая усилие от 0 до 6 кН к вершине опоры и измеряя величину прогиба x в точках стойки опоры, расположенных по длине стойки на расстояниях h, равных 3,0 м, 5,88 м, 7,4 м, 9,25 м, 11,11 м и 12,4 м от основания стойки. Усилие прикладывали с помощью лебедки, оборудованной датчиком измерения усилий.

Схема испытаний показана на рис. 2–3. Учитывая несимметричность моментов поперечного сечения конструкции относительно оси z, стойки испытывались при двух направлениях приложения усилия (рис. 2 *а*, *б*).



а



б

Рис. 2. Схема приложения нагрузки и график прогибов стойки опоры:
а – направление 1;
б – направление 2

Рис. 3. Установка для испытаний комбинированных стоек опор

По результатам проведенных стендовых испытаний комбинированных стоек опор ЛЭП, показавших их работоспособность с точки зрения обеспечения необходимой несущей способности изделий в предполагаемых условиях эксплуатации, была изготовлена ограниченная партия изделий для проведения опытно-промышленных испытаний в климатических условиях п. Тикси и с. Ючюгей Оймяконского района Республики Саха (Якутия). Эксплуатационные испытания опор комбинированного типа были начаты в сентябре 2014 г. на линиях с напряжением 6 кВ. По данным метеостанции Оймякон, минимальная температура в течение испытаний составила – 58,5 °С. По данным метеостанции п. Тикси, максимальная скорость ветра с учетом порывов составила в период испытаний 38 м/с. За три года испытаний дефектов и отклонений опор от первоначального положения (деформаций) не выявлено, замечаний от эксплуатирующей компании также не поступало. Эксплуатационные испытания стеклопластиковых пултрузионных профилей АпАТэК-СППС в составе комбинированной опоры ЛЭП мощностью до 10 кВ показали возможность их применения в районах холодного и очень холодного климата. Долговечность стеклопластика (более 70 лет) допускает многократное использование профилей, что будет способствовать экономии средств при ремонте и строительстве ЛЭП.

Таким образом, применение полимерных композитов, а именно стеклопластиков в конструкциях опор ЛЭП имеет ряд преимуществ. Но ввиду достаточно высокой стоимости стеклопластиковых профилей относительно деревянных внедрение происходит довольно медленно. В настоящей статье мы рассмотрели комбинированный вид опоры, где композит применен частично – в самом слабом месте опоры, что делает стоимость такой опоры приемлемой. Данный вариант можно считать переходным. Испытания полимерных композитов в конструкциях опор ЛЭП в суровых климатических условиях в настоящее время продолжаются.

Литература

1. Бочаров Ю. Н., Жук В. В. К вопросу о композитных опорах воздушных линий / / Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. – 2012. – Т. 4. – № 1. – С. 78–85.

2. Han-ming Li, Shi-cong Deng, Qian-hu Wei, Yu-ning Wu. Research on composite material towers used in 110 kV overhead transmission lines. High Voltage Engineering and Application (ICHVE). IEEE International Conference, New Orleans, LA, 2010. https://doi.org/10.1109/ICHVE.2010.5640768.

3. Donnelly R. The conductivity of composite fibre glass poles. IEEE 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2017. https://doi.org/10.1109/UPEC.2017.8231957.

4. Легкосборная опора линии электропередачи: патент РФ № 144157; заявитель и патентообладатель Институт проблем нефти и газа СО РАН, ПАО «Якутскэнерго».

5. Комбинированная опора линии электропередачи: патент РФ № 153416; заявитель и патентообладатель Институт проблем нефти и газа СО РАН, АО «Сахаэнерго».

6. Легкосборная траверса портальной опоры линии электропередачи: патент РФ № 156942; заявитель и патентообладатель Институт проблем нефти и газа СО РАН, ПАО «Якутскэнерго».

7. Крюков К. П., Новгородцев Б. П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи. – Л.: Энергия, 1979. – 312 с.

Development and testing of composite poles for overhead power lines in low temperature conditions

Yu. Yu. Fedorov,
Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia, PhD, senior researcher

S. V. Vasiljev,
Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia, research fellow

Weathering and high winds affect the utility support infrastructure. That increases maintenance costs and circuit interruptions and reduces overall system reliability. Significant advancements have been made in manufacturing of transmission and distribution poles using new high-strength fiberglass composites. We have developed and tested the novelty overhead power line pole combined of fiberglass channel bar and wood. The developed poles were tested for deflection and bending under imitation conditions and real operation. Testing involved intentional damage of the pole. The results have demonstrated robustness and reliability of the combined fiberglass poles confirmed by successful operation under low temperature conditions.

Keywords: *overhead power line pole, fiberglass, channel bar, deflection, bending.*

УДК 621.311.22 DOI 10.18635/2071-2219-2018-3-8-11

Суммарная токсичность продуктов сгорания отопительных котлов при сжигании кородревесных отходов и кузнецкого угля

М. С. Иваницкий,
филиал НИУ МЭИ в г. Волжском,
доцент кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника»,
кандидат технических наук

В продолжение исследований, посвященных экологической и энергетической безопасности тепловых электрических станций и котельных («Энергобезопасность и энергосбережение», № 6 2017 г.) предлагается изучение вклада полициклических ароматических углеводородов в формирование суммарной вредности продуктов сгорания твердотопливных котлов малой мощности, сжигающих каменный уголь и кородревесные отходы. Применяется критерий суммарной вредности продуктов сгорания, учитывающий частные показатели вредности всех токсичных компонентов дымовых газов.

Ключевые слова: *ТЭС, бенз(а)пирен, показатель частной вредности, экологическая безопасность, кородревесные отходы.*

Твердотопливные котлы характеризуются более высоким удельным содержанием бенз(а)пирена в уходящих газах, чем котлы, сжигающие природный газ или мазут. Бенз(а)пирен, наличие которого в дымовых газах косвенно свидетельствует о незавершенности процесса конверсии продуктов сгорания, является представителем полициклических ароматических углеводородов и обладает мутагенными и канцерогенными свойствами. Токсический эффект увеличивается при одновременном присутствии в продуктах сгорания полициклических ароматических углеводородов и оксидов азота. Поскольку при оценке общей вредности массовый выброс продуктов сгорания не отображает суммарную токсичность дымовых газов, при определении суммарной токсичности следует принимать во внимание частные показатели вредности компонентов газовых выбросов, учитывающие токсичность конкретного компонента дымовых газов. В настоящей работе будут выполнены анализ образования бенз(а)пирена в продуктах сгорания кородревесных отходов и оценка его вклада совместно с оксидами азота и монооксидом углерода в суммарную вредность уходящих газов. Для определения показателей частной вредности компонентов продуктов сгорания рассмотрены различные режимы работы отопительного котла малой тепловой мощности (менее 20 Гкал/ч) [1–10].

Численное исследование и моделирование

В качестве объекта исследования выбран твердотопливный котел КЕ-10-14С тепловой мощностью 5,5 Гкал/ч (6,4 МВт) с естественной циркуляцией со слоевыми механическими топками. Котел оборудован топками марки ТЛЗМ-2-2,7/3,0 с пневматическими забрасывателями топлива с ленточной решеткой обратного хода. Снабжен системой возврата уноса для дожигания продуктов неполного сгорания и сажи, осаждающейся в газоходе котла. Струи вторичного дутья способствуют образованию газовых вихрей, которые обеспечивают снижение химического недожога, и повышению эффективности выгорания мелочи топлива.

Основным топливом является кузнецкий каменный уголь марки Г (класс обогащения Р, СШ) со следующими минеральными и горючими характеристиками, приведенными к рабочей массе: W^r = 8,0 %, A^r = 14,3 %, C^r = 63,3 %, H^r = 4,4 %, S^r = 0,5 %, O^r = 7,4 %, N^r = 2,1 %, Q_i^r = 10,47 МДж/кг. Для условий сжигания кородревесных отходов горючие характеристики, приведенные к рабочей массе, равны: A^r = 0,3 %, C^r = 49,4 %, H^r = 6,0 %, O^r = 44,1 %, N^r = 0,2 %, Q_i^r = 10,47 МДж/кг. Расход кородревесных отходов в номинальном режиме работы – 2632 кг/ч.

В качестве варьируемых режимных параметров использован коэффициент избытка воздуха α в диапазоне от 1,2 до 1,6. Нагрузка котла изменялась в следующих пределах: $0{,}5 \le Q_ф / Q_н \le 1$. Очистка дымовых газов не производилась ($К_{ЗУ}$ = 1). Теплонапряжение топочного объема камеры q_V = 475 кВт/м^3. Объемный расход уходящих газов в заданном диапазоне коэффициента избытка воздуха варьировался в пределах 4,25÷8,51 м^3/с, температура продуктов сгорания в номинальном режиме работы котла в условиях сжигания кузнецкого каменного угля составляла 185 °С, при горении кородревесных отходов – 168 °С. Коэффициент полезного действия котла 83,5 %.

Концентрация бенз(а)пирена в сухих дымовых газах котлов малой мощности $С_{БП}$, мг/м^3, при слоевом сжигании твердых топлив, приведенная к

избытку воздуха в газах α = 1,4, рассчитывается по выражению из [3]:

$$C_{БП} = 10^{-3}\left(\frac{A \cdot Q_i^r}{e^{2,5\alpha}} + \frac{R}{t_Н}\right)\prod_{i=1}^{n} К_i, \quad (1)$$

где A – параметр, характеризующий тип колосниковой решетки и вид топлива (для углей и сланцев A = 2,5; для древесины и торфа A = 1,5);

R – коэффициент, характеризующий температурный уровень экранов (для $t_Н \geq 150$ °С, R = 350);

Q_i^r – теплотворная способность топлива, МДж/кг;

$\prod_{i=1}^{n} К_i = К_д \cdot К_{зу}$ – произведение коэффициентов для учета нагрузки котла, эффективности золоулавливающих устройств.

Погрешность данной методики составляет не более 20 %.

Концентрация оксидов азота C_{NO_2}, мг/м^3, в продуктах сгорания нефтяного кокса для энергетических котлов, учитывающая условия смесеобразования и степень выгорания топлива, рассчитывалась по уточненному уравнению согласно [2]:

$$C_{NO_2} = \frac{32640 N^r K_{конв}}{\beta_{сг} V_г^0 + (\alpha_{заг} - \beta_{сг}) V_в^0}, \quad (2)$$

где $K_{конв}$ – степень конверсии материнского азота топлива;

$\beta_{сг}$ – степень выгорания топлива;

$V_г^0$ – теоретический объем газов, выделяющихся при горении 1 кг топлива, м^3/кг;

$V_в^0$ – теоретический объем воздуха, необходимый для сжигания 1 кг топлива, м^3/кг;

$\alpha_{заг}$ – коэффициент избытка воздуха в зоне активного горения.

В целях сопоставления и суммирования вредного воздействия различных примесей на окружающую среду используется показатель суммарной вредности ΣП, который складывается из частных показателей токсичности выбросов $\sum П = \sum_{i=1}^{n} П$ [2].

Расчетный показатель частной вредности бенз(а)пирена определяется зависимостью:

$$П_{БП} = \frac{4,387 \cdot 10^{-3} C_{БП} V_г^0 (1 - \eta_{БП})}{Q_i^r ПДК_{сс}^{БП}}, \quad (3)$$

где $ПДК_{сс}^{БП}$ – среднесуточная предельно допустимая концентрация бенз(а)пирена, мг/м^3;

$\eta_{ПБ}$ – степень задержки бенз(а)пирена в газоочистной системе.

Для бенз(а)пирена установлены только среднесуточные предельно допустимые концентрации, поэтому он соотнесен со значением ПДК нетоксичной пыли, равным $ПДК_{сс}$=0,15 мг/м^3.

Частная вредность оксидов азота NO_2 рассчитывается уравнением:

$$П_{NO_2} = \frac{1,462 \cdot 10^{-2} C_{NO_2} V_г^0 (1 - \eta_{NO_2})}{Q_i^r ПДК_{м.р.}^{NO_2}}, \quad (4)$$

здесь $ПДК_{м.р.}^{NO_2}$ – максимально-разовая предельно допустимая концентрация оксидов азота, мг/м^3;

η_{NO_2} – степень очистки уходящих газов от оксидов азота.

Показатель частной вредности монооксида углерода CO определяется при помощи выражения:

$$П_{CO} = \frac{1,462 \cdot 10^{-2} C_{CO} V_г^0 (1 - \eta_{CO})}{Q_i^r ПДК_{м.р.}^{CO}}, \quad (5)$$

где $ПДК_{м.р.}^{CO}$ – максимально-разовая предельно допустимая концентрация монооксида углерода, мг/м^3;

η_{CO} – степень очистки продуктов сгорания от монооксида углерода.

Обсуждение результатов

Повышение паровой нагрузки котлоагрегата способствует улучшению условий образования пылевоздушной смеси и более полному ее выгоранию в топочной камере. График зависимости изменения содержания бенз(а)пирена в продуктах сгорания кородревесных отходов от относительной паровой нагрузки котла КЕ-10-14С в пределах режимной эксплуатации приведен на рис. 1.

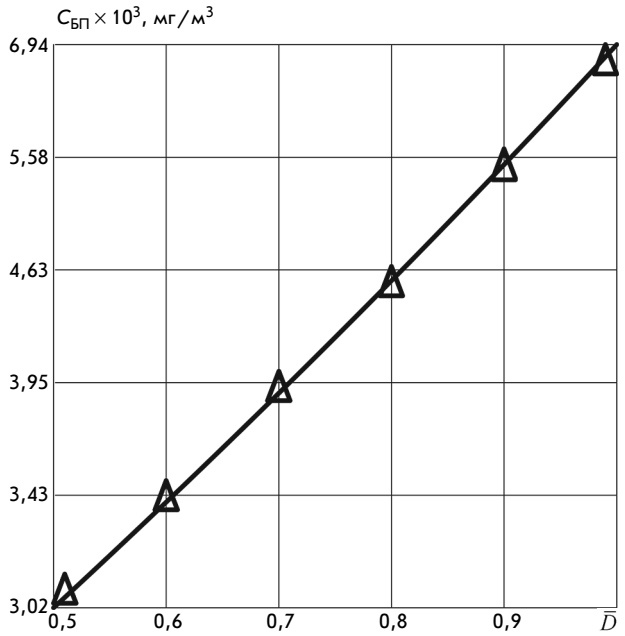


Рис. 1. Зависимость изменения содержания бенз(а)пирена в продуктах сгорания кородревесных отходов от относительной паровой нагрузки котла КЕ-10-14С

Удельный вклад бенз(а)пирена в формирование суммарной токсичности газовых выбросов для рассматриваемых режимов работы котла при сжигании проектного кузнецкого угля составляет от 19 до 22,5 %. Доля влияния оксидов азота при этом не пре-

вышает 75 %. Суммарная вредность продуктов сгорания котла изменяется в диапазоне от $7 \cdot 10^{-2}$ до $4{,}6 \cdot 10^{-2}$.

Для режима нагрева экранных труб $t_н < 150$ °С (коэффициент $R = 290$) концентрация бенз(а)пирена в продуктах сгорания кузнецкого угля при $\alpha = 1{,}2$ равна $5{,}08 \cdot 10^{-3}$ мг/м^3. В этом случае суммарная вредность продуктов сгорания составляет $3{,}41 \cdot 10^{-2}$, доля вклада оксидов азота – 44 %, бенз(а)пирена – 19,1 %. В условиях горения кородревесных отходов суммарная вредность уходящих газов равна 0,0603, при этом вклад бенз(а)пирена оценочно составил 10,8 %.

Влияние тепловой производительности котла на концентрацию бенз(а)пирена в уходящих газах описывается зависимостью:

$$K_д = \left(\frac{Q_н}{Q_ф}\right)^{1,2},$$

где $Q_н/Q_ф$ – отношение номинальной и фактической тепловой производительности котла.

Результаты расчета показателей вредности в зависимости от коэффициента избытка воздуха при номинальном режиме тепловой производительности котла КЕ-10-14С в условиях сжигания кузнецкого каменного угля и кородревесных отходов приведены на рис. 2.

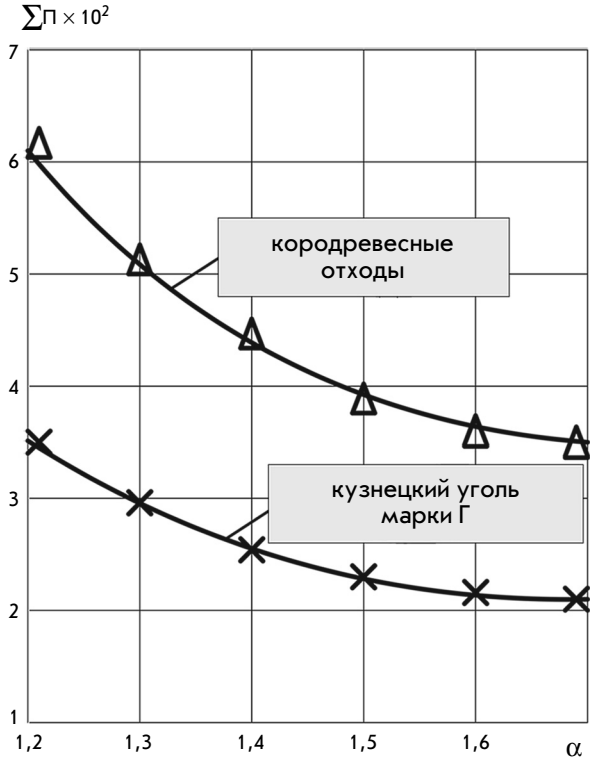


Рис. 2. Влияние коэффициента избытка воздуха на суммарную вредность продуктов сгорания при номинальном режиме тепловой производительности котла КЕ-10-14С

Для случая сжигания кузнецкого каменного угля марки Г содержание бенз(а)пирена в номинальном режиме работы котла равно $5{,}47 \cdot 10^{-3}$ мг/м^3. При этом удельный вклад бенз(а)пирена в суммарную вредность продуктов сгорания возрастает до 20,1 %. Концентрация оксидов азота для коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1{,}2$ составляет 487 мг/м^3, при $\alpha = 1{,}45$ содержание составляет 410 мг/м^3. Суммарная вредность продуктов сгорания для $\alpha = 1{,}2$ равна 0,0347. При увеличении коэффициента избытка воздуха до 1,45 вредность выбросов снижается на 39,7 %, доля токсичности, вносимая СО, составит не более 2,1 %. Максимальный вклад вредности NO_2 составляет 73,2 %.

Изменение частных показателей вредности бенз(а)пирена, NO_2, СО и суммарной вредности продуктов сгорания котла КЕ-10-14С в условиях сжигания кузнецкого угля в зависимости от расхода топлива представлено на рис. 3.

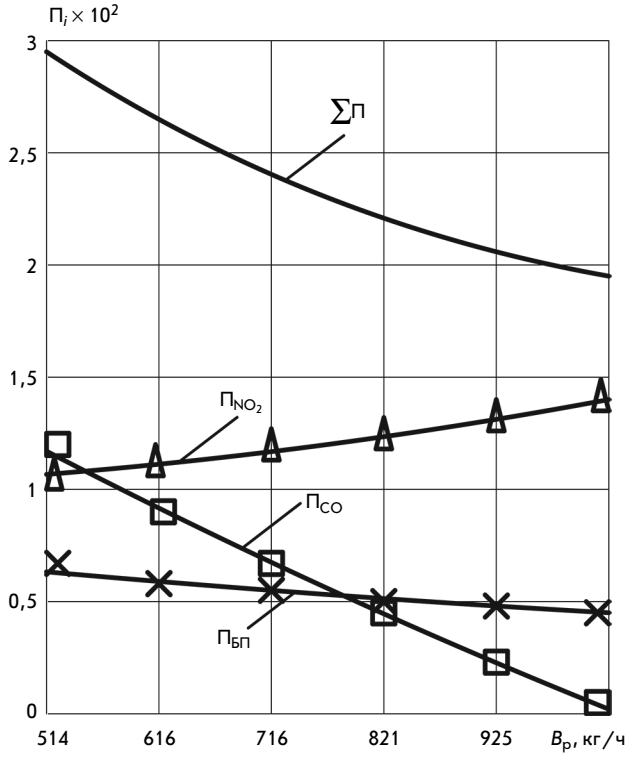


Рис. 3. Изменение частных показателей вредности бенз(а)пирена, NO_2, СО и суммарной вредности продуктов сгорания котла КЕ-10-14С в условиях сжигания кузнецкого угля в зависимости от расхода топлива $B_р$

Для относительно больших значений потерь тепла с химическим недожогом топлива $q_3 = 0{,}3$ % вклад монооксида углерода СО в суммарную токсичность выбросов равен 40,5 % (концентрация СО в уходящих газах 458 мг/м^3), для режима горения без химического недожога (содержание СО в продуктах сгорания 10–20 мг/м^3) доля монооксида углерода составляет не более 2 %.

Анализ данных, продемонстрированных на рис. 3, позволяет заключить, что для $B_р = 514$ кг/ч вклад бенз(а)пирена в суммарную вредность газовых выбросов равен 21,6 %, доля NO_2 равна 39,2 %. При дальнейшем увеличении нагрузки до номинального режима работы котла при горении проектного кузнецкого угля доля бенз(а)пирена составила 25 %, оксидов азота не более 73 %.

Выполненная оценка вклада канцерогенного бенз(а)пирена в суммарную вредность продуктов сгорания отопительных котлов при сжигании кородревесных отходов и каменного кузнецкого угля марки Г показала, что по сравнению с мощными энергетическими котлами доля, вносимая бенз(а)пиреном в суммарную вредность выбросов малой мощности, составила не менее 25 %. Полученный результат указывает на необходимость учета выбросов бенз(а)пирена при оценке формирования критерия экологической безопасности работы тепловых электростанций и котельных, прогнозировать затраты генерирующих предприятий на компенсации за выбросы вредных веществ в атмосферу и осуществлять планирование этапов внедрения на энергетическом производстве наилучших доступных технологий.

Литература

1. Росляков П. В., Ионкин И. Л., Егорова Л. Е. Система непрерывного мониторинга и контроля вредных выбросов ТЭС в атмосферу. – М.: МЭИ, 2000. – 158 с.
2. Росляков П. В. Методы защиты окружающей среды. – М.: МЭИ, 2007. – 336 с.
3. Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час. – М.: Государственный комитет по охране окружающей среды, 1999.
4. Keller C. D., Bidleman J. E. Collection of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons and other organics with a glass fiber filter-polyurethane foam system, Atmospheres Environmental, 1984, vol. 18, iss. 4, pp. 837–845. https://doi.org/10.1016/0004-6981(84)90269-5.
5. Beretta F., Cincotti V., D'Alessio A., et al. Ultraviolet and visible fluorescence in the fuel pyrolysis regions of gaseous diffusion flames, Combustion and Flame, 1985, vol. 61, iss. 3, pp. 211–218. https://doi.org/10.1016/0010-2180(85)90102-6.
6. Williams R. L., Perez J. M., Griffing M. E. A review of sampling condition effects on polynuclear aromatic hydrocarbons (PNA) from heavy-duty diesel engines, SAE Technical Paper 852081, 1985. https://doi.org/10.4271/852081.
7. Levin J., Nilsson C., Norstroem A. Sampling and analysis of PAH from two-stroke chain-sow engines, Chemosphere, 1984, vol. 13, iss. 3, pp. 427–435. https://doi.org/10.1016/0045-6535(84)90101-2.
8. Longwell J. P. The formation of polycyclic aromatic hydrocarbons by combustion, 19th Symposium (International) on Combustion, 1982, vol. 19, iss. 1, pp. 1339–1350. https://doi.org/10.1016/s0082-0784(82)80310-X.
9. Jacob J., Karcher W., Wagstaffe P. J. Polycyclic aromatic compounds of environmental and occupational importance. Their occurrence, toxicity and the development of high purity certified reference materials. Part I, Fresenius' Zeitschrift für Analytische Chemie, 1984, vol. 317, iss. 2, pp. 101–114. https://doi.org/10.1007/BF00594058.
10. Brorstroem-Lunden E., Lindskog A. Degradation of PAH during simulated stack gas sampling, Environmental Science and Technology, 1985, vol. 19, iss. 4, pp. 313–316. https://doi.org/10.1021/es00134a001.

Joint toxicity effect of emissions from coal-fired and wood-fired boilers

M. S. Ivanitskiy,
The Volzhsk Branch of MPEI, Russia, PhD, associate professor

Emissions of hazardous air pollutants from coal-fired and wood-fired boilers, particularly of polycyclic aromatic hydrocarbons, can be more noticeable than air pollutants from gas boilers. That is why it is so important to estimate a benzo(a)pyrene emissions in order to care of environmental safety and to implement best available technologies related to environmental hazards of thermal power stations. This paper highlights individual and joint toxicity effects of polycyclic aromatic hydrocarbons, nitrogen oxides, and carbon monoxide in coal-fired and wood-fired boiler emissions. The complexity of their joint toxicity effect has been proven to be higher than simple adding of their individual toxicity effects, so it is recommended to pay attention to both criteria, individual and joint.

Keywords: *thermal power station, benzo(a)pyrene, individual toxicity effect, environmental safety, wood and bark waste.*

УДК 66.021.3/4 DOI 10.18635/2071-2219-2018-3-12-15

Гидродинамика в струйно-барботажном контактном устройстве

А. В. Дмитриев,
Казанский государственный энергетический университет,
заведующий кафедрой «Теоретические основы теплотехники»,
доктор технических наук, доцент

И. Н. Мадышев,
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
старший научный сотрудник кафедры оборудования пищевых производств,
кандидат технических наук

О. С. Дмитриева,
Казанский государственный энергетический университет,
старший научный сотрудник кафедры «Теоретические основы теплотехники»,
кандидат технических наук

Модернизация существующих градирен заключается в том числе в использовании современных высокоэффективных контактных устройств, способных обеспечить минимальный унос жидкости потоком воздуха, значительную поверхность контакта фаз и минимальное гидравлическое сопротивление. В качестве предложения по повышению эффективности процесса охлаждения воды в промышленных градирнях представлены конструкция струйно-барботажного контактного устройства и процесс взаимодействия потоков газа и жидкости в указанном устройстве. Приведены результаты исследования по определению минимального размера газового пузыря.

Ключевые слова: *гидродинамика, энергоэффективность, контактное устройство, барботаж, тепломассообмен.*

Мировые затраты на развитие водного хозяйства для нужд водоснабжения, канализации, водоочистки и охраны окружающей среды, по предварительным данным, до 2025 года составят порядка 180 млрд долларов в год. Применение эффективных водосберегающих и водоохранных мероприятий и технологий способно сократить данные затраты на 10–25 млрд долларов ежегодно [1]. На предприятиях химии, нефтехимии и энергетики охлаждение оборотной воды происходит преимущественно в градирнях, что довольно эффективно с точки зрения материальных затрат, объемов потребления воды, улучшения качества естественных водоемов и уменьшения антропогенного воздействия на них. Существуют различные конструкции градирен [2–4], но, тем не менее, для них характерна одна общая проблема биообрастания поверхностей вследствие размножения в воде микроорганизмов, водорослей, грибков. Биообрастание приводит к ухудшению теплопередачи и к коррозии внутренних поверхностей системы оборотного водоснабжения, что в значительной мере снижает надежность и экономичность работы теплоэнергетических установок и систем теплоснабжения [5]. Существует также проблема, связанная с тем, что насадочные устройства не обеспечивают требуемой эффективности охлаждения воды, а каплеотбойные устройства имеют повышенный процент уноса капельной влаги [2].

Для повышения эффективности работы промышленных градирен необходима модернизация существующих аппаратов, которая заключается в использовании современных высокоэффективных контактных устройств, способных обеспечить минимальный унос жидкости потоком воздуха, большую поверхность контакта фаз и минимальное гидравлическое сопротивление. Примером такой конструкции является струйно-барботажное контактное устройство для тепломассообменных аппаратов (рис. 1) [6].

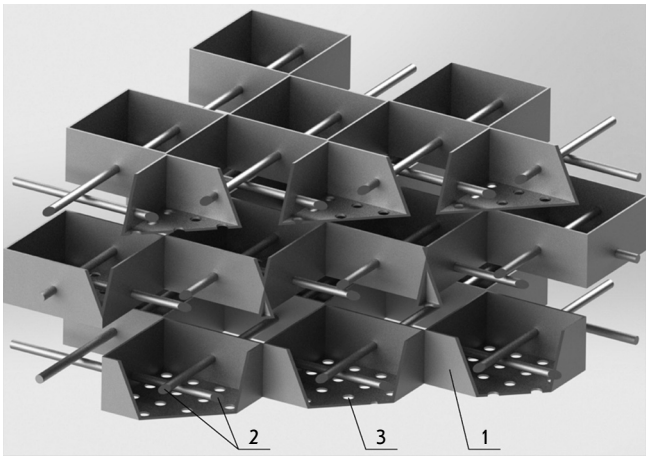


Рис. 1. Вид струйно-барботажного контактного устройства [6]:
1 — сливной стакан; 2 — стержень; 3 — отверстия

Устройство состоит из сливных стаканов, в которых поддерживается уровень жидкости; стаканы в каждом ряду соединены между собой с помощью стержней. В днище выполнены многочисленные отверстия для слива жидкости на расположенный ниже уровень. Схема взаимодействия потоков газа и жидкости в предлагаемом струйно-барботажном контактном устройстве представлена на рис. 2.

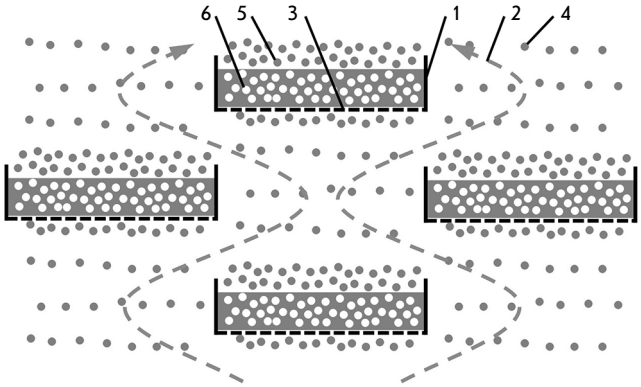


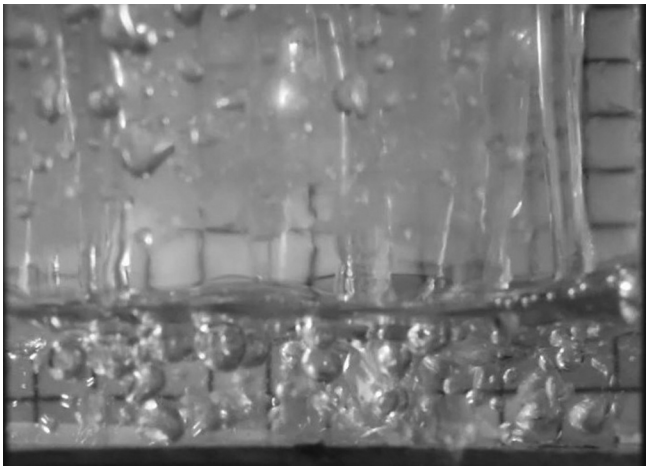
Рис. 2. Схема взаимодействия потоков газа и жидкости в струйно-барботажном контактном устройстве [6]:
1 — сливной стакан;
2 — поток газа;
3 — перфорированное днище;
4 — капли, образованные перфорированным устройством;
5 — капли, вылетающие из жидкости;
6 — пузыри

Жидкость через отверстия в днище сливных стаканов диспергируется в виде струй на расположенный ниже уровень сливных стаканов. Сливные стаканы располагаются горизонтально в шахматном порядке, образуя тарелку, причем нижерасположенная тарелка имеет смещение стаканов, формируя их шахматное расположение по вертикали. По этой причине газ, поступающий снизу под тарелку, движется зигзагообразно (рис. 2) [7].

При движении струй жидкости происходит их распад с образованием множества капель, которые, соударяясь о поверхность жидкости, находящейся внутри стаканов, разлетаются в виде брызг. Таким образом, создается развитая, постоянно обновляющаяся поверхность контакта фаз, которая определяется наличием относительно небольших газовых пузырей в слое жидкости и вылетающими каплями с поверхности. Кроме того, восходящий поток газа контактирует с падающими струями или каплями жидкости, образуя вторую зону контакта газа и жидкости. При условии, что расстояние между сливными стаканами на одном уровне равно ширине сливного стакана, обеспечивается равнопроточность для прохода газа, что снижает гидравлическое сопротивление предлагаемого устройства. Для обеспечения максимальной эффективности тепломассообменных процессов сливные стаканы в поперечном сечении имеют форму квадрата. Таким образом, организация взаимодействия между газом и жидкостью позволяет интенсифицировать тепло- и массообменные процессы как в жидкой, так и в газовой фазе при относительно простом аппаратурном оформлении [7].

Исследования показали, что при небольших скоростях воздуха (до 2,3–2,7 м/с) эффективность теплообмена практически не зависит от плотности орошения. При дальнейшем увеличении скорости воздуха тепловая эффективность резко возрастает и достигает 42–54 % [7]. В режиме подвисания массообменная эффективность охлаждения оборотной воды достигает 62–78 % в зависимости от плотности орошения.

Как показывают проведенные экспериментальные исследования гидродинамики барботажного слоя в контактных элементах, в подвижной жидкости имеются газовые пузыри, движущиеся в противоположном направлении (рис. 3) [8].



а

б

Рис. 3. Барботажный слой в устройстве [8]:
а — при $2(h + h_1) = 50$ мм;
б — при $2(h + h_1) = 100$ мм,
где h — расстояние по высоте между соседними стаканами, м;
h_1 — высота боковых стенок стаканов, м.

Изображение на рис. 1 получено фотоаппаратом Nikon 1 J4 с объективом 1 NIKKOR VR 10–100 mm f/4.0–5.6 (эффективное количество пикселей 18 млн, датчик изображения – матрица CMOS 1 дюйма с кроп-фактором 2,7, выдержка затвора 1/16000 с, фокусное расстояние 10–100 мм, макси-

мальная диафрагма f/4–5,6). Видно, что большинство образующихся газовых пузырей обладают формой, незначительно отличающейся от сферической, что характерно в основном для пузырей диаметром менее 4 мм. Остальные 10–15 % в зависимости от направления их движения представляют собой вытянутые или сплющенные эллипсоиды вращения. С увеличением расстояния между сливными стаканами наблюдается значительное искривление поверхности раздела газ – жидкость (в некоторых случаях амплитуда достигает 70 % от минимальной высоты слоя жидкости) и образование барботажно-пенного слоя, что приводит к повышению эффективности и интенсивности тепломассообменных процессов. Унос жидкой фазы отсутствовал (рис. 3).

В связи с этим важно определить минимальный размер пузыря, необходимый для его всплытия. Скорость жидкости в контактном элементе определяется как

$$U_{\text{срк}} = U_{\text{ср}} \frac{n_0 \pi d_0^2}{4b^2}, \qquad (1)$$

где $U_{\text{ср}}$ – среднерасходная скорость истечения жидкости из сливных отверстий, м/с;
b – ширина контактного элемента, м;
n_0 – количество отверстий в одном контактном элементе;
d_0 – диаметр отверстий, м.

Среднерасходную скорость истечения жидкости можно получить из уравнения расхода:

$$U_{\text{ср}} = \frac{4L_V}{n_0 \pi d_0^2}, \qquad (2)$$

где L_V – объемный расход жидкости, м^3/с.

С учетом (2) выражение (1) запишется:

$$U_{\text{срк}} = \frac{L_V}{b^2}. \qquad (3)$$

Установившаяся скорость всплытия газового пузыря может быть найдена из уравнения:

$$\frac{\pi a_G^3}{6} \rho_L g = c_a \frac{\pi a_G^2}{4} \frac{\rho_L}{2} W_a^2,$$

где W_a – установившаяся скорость всплытия, м/с;
ρ_L – плотность жидкости, кг/м^3;
a_G – диаметр газового пузыря, м;
c_a – коэффициент сопротивления;
g – ускорение свободного падения, м/с^2.

Минимальный диаметр пузыря можно определить из условия: $W_a > U_{\text{срк}}$. После преобразования получим:

$$\sqrt{\frac{4}{3} \frac{g a_G}{c_a}} > U_{\text{срк}},$$

тогда

$$a_{G\min} = \frac{3}{4} \frac{c_a}{g} U_{\text{срк}}^2. \qquad (4)$$

Для стоксового режима движения пузыря выражение (4) можно записать:

$$a_{G\min} = \sqrt{\frac{18 \nu_L U_{\text{срк}}}{g}}, \qquad (5)$$

где ν_L – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м^2/с.

С учетом (3) выражение (5) можно записать:

$$a_{G\min} = \frac{1}{b} \sqrt{\frac{18 \nu_L L_V}{g}}.$$

Расчеты проводились для системы «воздух – вода» при температуре 20 °С, расход воды изменялся от 0,5 до 5,5 м^3/ч при разных геометрических параметрах контактного устройства. Минимальный диаметр газового пузыря определяется расходом жидкости, ее физическими свойствами и особенностями конструкции самого устройства.

Увеличение ширины сливного стакана приводит к обратно пропорциональному уменьшению размера газового пузыря, необходимого для всплытия. С увеличением расхода жидкости минимальный диаметр пузыря также растет.

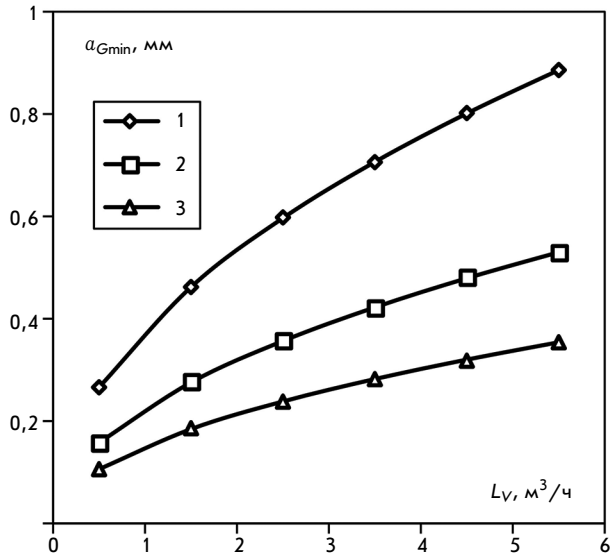


Рис. 4. Зависимость минимального диаметра газового пузыря от объемного расхода жидкости:
1 – при b = 0,06 м;
2 – при b = 0,1 м;
3 – при b = 0,15 м

Большая часть образовавшихся газовых пузырей (95–99 %) всплывает к поверхности раздела газ – жидкость, увеличивая площадь контакта фаз.

Выполненные исследования позволяют утверждать, что использование предлагаемых струйно-барботажных контактных устройств позволит создавать высокоэффективные градирни. При использовании оптимальных режимов работы и конструкции наблюдаются большая площадь контакта фаз, малый унос жидкости и гидравлическое сопротивление.

Предлагаемые контактные устройства можно устанавливать при достаточно больших значениях ширины сливного стакана, что снизит металлоемкость конструкции и позволит уменьшить вероятность ее загрязнения. Диаметр отверстий необходимо выбирать исходя из условия обеспечения необходимого времени контакта для достижения заданных параметров охлаждения оборотной воды.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60081 мол_а_дк.

Литература

1. Gleick P. H. Global freshwater resources: soft-path solutions for the 21th century, Science, 2003, vol. 302, iss. 5650, pp. 1524–1527. https://doi.org/10.1126/science.1089967.

2. Пономаренко В. С., Арефьев Ю. И. Градирни промышленных и энергетических предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 376 с.

3. Носиков А. А. Теплоэнергетическая эффективность охладителей водооборотных циклов / / Вести Национальной академии наук Беларуси. – 2008. – № 2. – С. 107–110.

4. Бергман Д. Испарительные градирни: современные конструкции и преимущества реконструкции / / Энергетик: спецвыпуск. – 2000. – С. 15–21.

5. Shen C., Cirone C., Jacobi A. M., Wang X. Fouling of enhanced tubes for condensers used in cooling tower systems: A literature review, Applied Thermal Engineering, 2015, vol. 79, pp. 74–87. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.014.

6. Дмитриев А. В., Дмитриева О. С., Мадышев И. Н., Сагдеева Г. С., Николаев А. Н. Струйно-барботажное контактное устройство для тепломассообменных процессов: патент РФ 156379; МПК B01D 3/20; № 2015119123/05.

7. Дмитриев А. В., Мадышев И. Н., Дмитриева О. С. Определение эффективности охлаждения оборотной воды в струйно-барботажных контактных элементах / / Экология и промышленность России. – 2016. – Т. 20. – № 6. – С. 4–7. http://dx.doi.org/10.18412/1816-0395-2016-6-4-7.

8. Мадышев И. Н. Гидродинамика и массообмен в аппаратах со струйно-пленочным контактом фаз: дисс. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2017.

Jet bubbling contact device hydrodynamics

A. V. Dmitriev,
Kazan State Power Engineering University,
Russia, head of the Department of Thermal Theory,
Doctor of Science

I. N. Madyshev,
Kazan National Research Technological University,
Russia, Department of Food Production Equipment,
senior researcher, PhD

O. S. Dmitrieva,
Kazan State Power Engineering University,
Russia, Department of Thermal Theory,
senior researcher, PhD

Power plan cooling tower become inefficient from age or damage and require certain upgrades, including use of new direct-contact jet devices to ensure low hydraulic resistance and the highest phase contact. This paper presents the promising jet bubbling contact device intended to increase water cooling efficiency. Interconnection processes between gas bubbles and liquid in the proposed device have been described. The smallest size of a gas bubble has been determined.

Keywords: *hydrodynamics, energy efficiency, contact device, jet bubbling, heat and mass transfer.*

УДК 697.142 DOI 10.18635/2071-2219-2018-3-16-20

Сравнение коэффициентов тепловой аккумуляции многоэтажных зданий

М. В. Горелов,
Московский энергетический институт,
доцент кафедры тепломассообменных процессов и установок,
кандидат технических наук

Е. М. Горячева,
Московский энергетический институт,
старший преподаватель кафедры тепломассообменных процессов и установок

М. Ю. Юркина,
Московский энергетический институт,
доцент кафедры тепломассообменных процессов и установок,
кандидат технических наук

В работе дан анализ терминов «теплоаккумулирующая способность» и «коэффициент тепловой аккумуляции» применительно к многоэтажным жилым зданиям. В связи с тем, что строительство зданий, для которых известны нормативные значения коэффициента тепловой аккумуляции, больше не выполняется, а остающиеся в эксплуатации подлежат сносу, на данный момент отсутствует актуальная информация о коэффициентах тепловой аккумуляции для жилых домов современных типовых серий. Авторами произведен анализ ограждающих конструкций и планировочных решений жилых домов, определен коэффициент тепловой аккумуляции помещений современного панельного здания массовой застройки с учетом влияния конструктивных особенностей отопительных приборов, выполнено сравнение с ранними типовыми сериями жилых зданий.

Ключевые слова: *коэффициент тепловой аккумуляции, теплоаккумулирующая способность, тепловая защита зданий.*

На большей части территории нашей страны средняя годовая температура воздуха не превышает 0 °С, а продолжительность отопительного периода составляет более полугода. В подобных климатических условиях обеспечение надежности теплоснабжения жилых, общественных и производственных зданий является стабильно актуальной задачей. Старение основных фондов и недостаточные темпы обновления тепловых сетей являются причинами высокой аварийности систем теплоснабжения. Количество аварий на тепловых сетях ежегодно растет и кратно превышает показатели аналогичных систем в других странах (рис. 1) [1]. На рис. 1 для корректности сравнения показаны пять типов российских городов с разным количеством жителей и, как следствие, разными объемами производства теплоты и протяженностью систем теплоснабжения: РФ4 – пример системы теплоснабжения города с населением 340 тыс. чел. с выработкой теплоты около 1,3 млн Гкал/год при присоединенной тепловой мощности 1000 Гкал/ч и 400 км эксплуатируемых теплосетей в двухтрубном исполнении; РФ1 – население более 50 тыс. чел., РФ2 – 100 тыс. чел., РФ3 – 200 тыс. чел., РФ5 – более 1 млн чел. [1].

Среднее время ремонта поврежденного участка тепловых сетей и восстановления теплоснабжения в соответствии с СП 124.13330.2012 «Тепловые сети» составляет от 5 до 50 часов. Реальная продолжительность времени, имеющаяся в распоряжении ремонтной бригады, зависит от многих условий: температуры наружного воздуха, температуры внутреннего воздуха, состава и толщины материалов ограждающих конструкций зданий. В инженерной практике, в частности в «Правилах технической эксплуатации тепловых энергоустановок», широко используется такое понятие, как «теплоаккумулирующая способность», под которым понимается именно время остывания здания до определенных значений, прописанных в нормативных документах. В научной литературе чаще встречается понятие «коэффициент тепловой аккумуляции» [2–4].

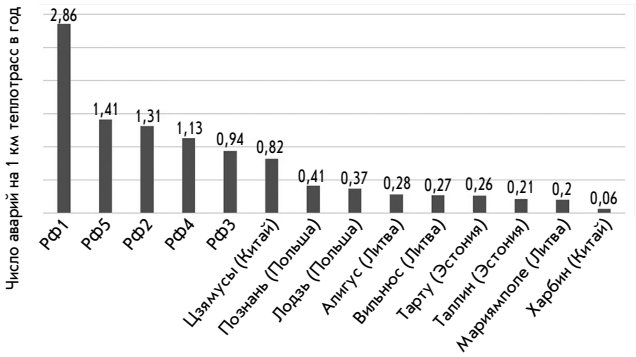


Рис. 1. Удельное число аварий на 1 км тепловых сетей [1]

Теплоаккумулирующая способность

В соответствии с требованиями Приказа Ростехнадзора № 212 «Об утверждении порядка организации работ по выдаче разрешений на допуск в эксплуатацию энергоустановок», при подаче документов на допуск в постоянную эксплуатацию тепловых энергоустановок и тепловых сетей предоставляются технические отчеты о проведенных испытаниях (измерениях), включая отчет о тепловых испытаниях отопительных систем с определением теплозащитных свойств ограждающих конструкций и теплоаккумулирующей способности зданий. Как правило, в технических отчетах представлена динамика остывания температуры внутреннего воздуха, которая определена экспериментально. Время снижения температуры внутреннего воздуха в условиях эксперимента не является объективным значением, так как на момент аварии погодные условия могут отличаться от условий эксперимента.

По этой причине, с нашей точки зрения, вместо термина «теплоаккумулирующая способность» следует использовать термин «коэффициент тепловой аккумуляции». Коэффициент тепловой аккумуляции зависит от свойств материалов наружных и внутренних стен и перекрытий, а не от температуры наружного воздуха.

Коэффициент тепловой аккумуляции здания (помещения) для наиболее популярных типовых серий представлен в [5]. В данном документе приведены значения коэффициента тепловой аккумуляции для жилых зданий серий 1-605А и К-7.1-605А – это серия крупнопанельных типовых жилых домов, которая была разработана в конце 1950-х годов, строительство домов этой серии проходило с 1958 по 1966 год. Массовый снос пятиэтажных домов серии 1-605А осуществлялся с середины 1990-х; к настоящему моменту в Москве осталось около 40 домов данной серии [6]. Серия К-7 включает пятиэтажные крупнопанельные жилые дома, созданные по проекту В. П. Лагутенко, строительство которых велось с 1958 по 1969 год. По требованиям к энергоэффективности и жилищному комфорту данная серия серьезно устарела, кроме того, срок службы домов К-7 по проекту составляет 25 лет. В программу сноса, согласно постановлению Правительства Москвы от 06.07.1999 № 608, были включены 1722 таких дома, и большая часть из них уже демонтирована, а снос оставшихся планируется завершить в 2018 году.

Таким образом, строительство зданий, для которых известны значения коэффициента тепловой аккумуляции, больше не выполняется, и на данный момент отсутствует актуальная информация о значениях коэффициента тепловой аккумуляции для жилых домов современных типовых серий.

Определение коэффициента тепловой аккумуляции помещений панельного здания серии П-44Т

Серия панельных многоэтажных зданий П-44Т является одной из самых распространенных серий на протяжении последних 20 лет. Ограждающие конструкции зданий серии П-44Т отвечают современным требованиям по тепловой защите [7]. Характеристики ограждающих конструкций такого здания приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики ограждающих конструкций здания серии П-44Т

Ограждающие конструкции	Материал	Толщина, мм	Плотность, кг/м^3	Теплоемкость, кДж/(кг·К)
Наружная стена	Мелкозернистый бетон	75	2300	0,84
	Тяжелый бетон	75	2400	0,84
	ПСБ марки 15А	130	15	1,34
	Керамическая плитка	15	700	0,88
Перекрытия под теплым чердаком	Полнотелый железобетон	140	2400	0,84
	Полужесткие минераловатные плиты	150	100	0,84
Пол помещений	Полнотелый железобетон	140	2400	0,84
	Мягкая древесноволокнистая плита	25	1050	2,3
	Паркетная доска	15	700	0,88
Внутренняя стена	Полнотелый железобетон	180	2500	0,84

Коэффициент тепловой аккумуляции определяется по формуле из [2]:

$$\beta = \frac{k_т \cdot \sum \delta_i \cdot c_i \cdot \rho_i \cdot F_i / 2}{3,6 \cdot \sum k_i \cdot F_i + L \cdot (c \cdot \rho)_{вз}}, \qquad (1)$$

где $k_т$ – поправочный коэффициент для расчета теплоаккумуляции различных ограждающих конструкций, учитывающий способ обогрева [4];

δ_i – площадь i-й ограждающей конструкции, м^2;

F_i – толщина i-й ограждающей конструкции, м;

c_i – удельная теплоемкость материала i-й ограждающей конструкции, кДж/(кг·К);

ρ_i – плотность материала i-й ограждающей конструкции, кг/м^3;

k_i – коэффициент теплопередачи i-й ограждающей конструкции, Вт/(м^2·К);

L – объемный расход воздуха, м^3/ч;

$c_{вз}$ – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К);

$\rho_{вз}$ – плотность воздуха, кг/м^3.

Коэффициент тепловой аккумуляции был определен для отдельных помещений здания П-44Т. Тип и расположение помещений в здании был выбран аналогично помещениям зданий серий 1-605А и К-7 [5]. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Панельное здание П-44Т является более массивной конструкцией по сравнению с панельными зданиями, которые были спроектированы в конце 50-х годов XX века. Существенное влияние на это оказывает толщина стен. В домах серии 1-605А толщина наружных стен составляет 210 мм, из которых 120 мм – толщина утеплителя. В серии К-7 толщина стены составляет 160 мм, а в серии П-44Т – 295 мм, из которых на утеплитель приходится 130 мм.

В домах 1-605А и К-7 используются минераловатные плиты, теплоемкость которых ниже, а теплопроводность выше, чем у пенополистирольных плит в домах П-44Т, что также оказывает влияние на коэффициент тепловой аккумуляции (табл. 2) за счет снижения удельной отопительной характеристики здания.

Зная численное значение коэффициента тепловой аккумуляции, можно выстроить график остывания помещения на основании выражений, которые представлены в [3, 4]. Выражение для процесса охлаждения помещения имеет вид [4]:

$$\Delta t(z)=\frac{\Delta t_{\text{охл}}}{1-\beta\cdot m}\cdot e^{-z\cdot m}+\left(\Delta t_{\text{охл}}-\frac{\Delta t_{\text{охл}}}{1-\beta\cdot m}\right)\cdot e^{-\frac{z}{\beta}}, \qquad (2)$$

где $\Delta t_{\text{охл}}$ – температурный напор к началу охлаждения, °С;

m – темп охлаждения отопительного прибора, ч$^{-1}$;

z – время, ч.

$$\Delta t_{\text{охл}}=t_{\text{в}}-t_{\text{н}}, \qquad (3)$$

где $t_{\text{в}}$ – температура внутри помещения на момент начала охлаждения, °С;

$t_{\text{н}}$ – температура наружного воздуха, °С.

Темп охлаждения отопительного прибора рассчитывается по формуле из [3]:

$$m=\frac{\psi\cdot\alpha\cdot F}{C_p\cdot\rho\cdot V}, \qquad (4)$$

где ψ – характеристика неравномерности распределения температуры в сечении тела (для чугунных и стальных радиаторов, конвекторов данное значение приблизительно равно единице);

α – коэффициент теплоотдачи на внешней поверхности отопительного прибора, Вт/(м^2·К);

F – площадь отопительного прибора (секции), м^2;

C_p – теплоемкость материала отопительного прибора и теплоносителя, кДж/(кг·К);

ρ – плотность материала отопительного прибора и теплоносителя, кг/м^3;

V – объем материала отопительного прибора и теплоносителя, м^3.

Таблица 2

Сравнение значений коэффициентов тепловой аккумуляции панельных зданий

Характеристика зданий	Помещения		Коэффициент тепловой аккумуляции β, ч
Крупнопанельный дом серии 1-605А	среднего этажа	угловое	46
		среднее	77
	верхнего этажа	угловое	42
		среднее	77
Крупнопанельный жилой дом серии К-7	среднего этажа	угловое	40
		среднее	51
	верхнего этажа	угловое	32
		среднее	51
Панельное здание П-44Т	среднего этажа	угловое	121
		среднее	148
	верхнего этажа	угловое	105
		среднее	130

В современных панельных зданиях, в том числе и серии П-44Т, устанавливаются различные типы отопительных приборов, включая биметаллические радиаторы, конвекторы травмобезопасные типа «Универсал». Численные значения темпа охлаждения распространенных отопительных приборов, рассчитанные по формуле (4), приведены в табл. 3.

Зная тип отопительного прибора и численное значение коэффициента тепловой аккумуляции, можно построить график изменения температуры внутреннего воздуха помещения при отключении системы отопления по формуле (2). На рис. 2 показан график изменения температуры внутреннего воздуха после отключения системы отопления. На графике представлены кривые, соответствующие значениям коэффициента тепловой аккумуляции здания серии П-44Т из табл. 2. График ограничен по оси ординат значением 8 °С, так как в [5] данное значение указано как пороговое, ниже которого возникает опасность замораживания трубопрово-

Таблица 3

Темп охлаждения отопительных приборов

Отопительный прибор	Охлаждение с теплоносителем (водой)	Охлаждение без теплоносителя
Конвектор стальной КСК20-1.838К	8,6	12,9
Радиатор биметаллический РБС-500	6,5	10, 7
Радиатор биметаллический РБС-300	5,5	9,7
Радиатор чугунный типа МС-140М2	0,7	2,0

дов в подвалах, на лестничных клетках и чердаках зданий.

Кривые на рис. 2 подтверждают, что среди рассмотренных помещений дольше всего будет остывать среднее помещение среднего этажа, то есть помещение с наибольшим значением коэффициента тепловой аккумуляции $\beta = 148$ ч.

Проведенный анализ ограждающих конструкций и планировочных решений типовых зданий серий 1-605А, К-7 и П-44Т и произведенные расчеты позволяют сделать вывод о том, что существующая нормативная база частично утратила свою актуальность, поскольку в настоящее время большинство жилых домов типовых серий, спроектированных в 50-х годах прошлого века, снесены, а на их месте возводятся новые здания современных серий и индивидуальных проектов. Поэтому использовать имеющиеся документы, в частности МДС 41-6.2000, для подготовки к проведению отопительного периода не представляется возможным. Существует необходимость в разработке нового нормативного документа, направленного на организацию подготовки к проведению отопительного периода, или существенной переработки имеющегося. Для этого следует провести анализ городских застроек крупных населенных пунктов, определить наиболее популярные типовые серии, которые возводятся в настоящее время, и выполнить расчет численных значений коэффициентов тепловой аккумуляции основных помещений таких зданий.

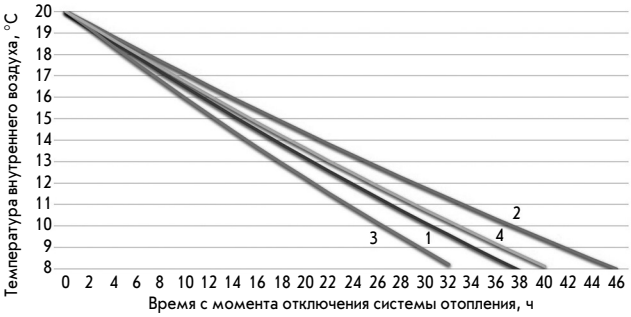


Рис. 2. Изменение температуры внутреннего воздуха помещений панельного здания серии П-44Т:

1 — угловое помещение среднего этажа;
2 — среднее помещение среднего этажа;
3 — угловое помещение верхнего этажа;
4 — среднее помещение верхнего этажа

Литература

1. Отчет о ситуации с теплоснабжением в Российской Федерации. – М.: Фонд энергетического развития, 2014.

2. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 472 с.

3. Бурцев В. В. Оптимизация теплопотребления зданий с помощью систем автоматического регулирования: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.03 /Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, 2007.

4. Кононович Ю. В. Тепловой режим зданий массовой застройки. – М.: Стройиздат, 1986. – 157 с.

5. МДС 41-6.2000 «Организационно-методические рекомендации по подготовке к проведению отопительного периода и повышению надежности систем коммунального теплоснабжения в городах и населенных пунктах Российской Федерации». – М.: Государственный комитет Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу РАО «Роскоммунэнерго», 2000.

6. Комплекс градостроительной политики и строительства [Электронный ресурс]. Код доступа: https://stroi.mos.ru/snos-piatietazhiek/pyatietazhki-snosimyh-serii.

Heat accumulation rates for multi-floor residential buildings

M. V. Gorelov,
Moscow Power Engineering Institute, Russia,
Department of Heat and Mass Transfer Processes and Equipment,
PhD, associate professor

E. M. Goryacheva,
Moscow Power Engineering Institute, Russia,
Department of Heat and Mass Transfer Processes and Equipment,
senior lecturer

M. Yu. Yurkina,
Moscow Power Engineering Institute, Russia,
Department of Heat and Mass Transfer Processes and Equipment, PhD,
associate professor

Heat energy accumulation in exterior walls strongly affects general energy efficiency of a building and helps developing more effective heating systems. Some standard residential building types with particular heat accumulation rates are no longer on the construction market, so new projects ofapartment houses need to be evaluated with regard to heat accumulation rates. In this paper, the authors explain the difference between a heat accumulation rate and heat accumulating capacity related to multi-floor residential buildings and calculate heat accumulation rates for new construction. Regulations on district heating and seasonal centralized heat supply should obviously be updated in order to effectively organize heating in new apartment house projects.

Keywords: *heat accumulation rate, heat accumulating capacity, thermal protection of buildings.*

УДК 620.91 DOI 10.18635/2071-2219-2018-3-21-26

Методика оптимизированного проектирования микросетей с возобновляемыми источниками энергии

Ф. Р. Исмагилов,
Уфимский государственный авиационный технический университет, заведующий кафедрой электромеханики, доктор технических наук, профессор

И. Х. Хайруллин,
Уфимский государственный авиационный технический университет, кафедра электромеханики, доктор технических наук, профессор

В. Е. Вавилов,
Уфимский государственный авиационный технический университет, кафедра электромеханики, кандидат технических наук

А. М. Якупов,
Уфимский государственный авиационный технический университет, кафедра электромеханики, ОМС ООО «БЭСК инжиниринг», инженер

Г. Ф. Якупова,
Уфимский государственный авиационный технический университет, кафедра электромеханики, ДРЗА ООО «Башкирэнерго», инженер

Предлагается новый способ оптимизированного проектирования микросетей, в основе которого лежит генетический алгоритм – эволюционный алгоритм систем искусственного интеллекта. Исследуемый способ проектирования позволяет получить конфигурацию межузловых связей, определить мощности генерации в узлах и учесть потери в сетях. Было осуществлено апробирование предлагаемого способа и определены предпочтительные параметры генетического алгоритма.

Ключевые слова: *возобновляемые источники энергии, генетический алгоритм, микросеть, проектирование.*

При проектировании микросетей с возобновляемыми источниками энергии необходимо получать такие конфигурации и мощности, которые максимально надежно и качественно обеспечивали бы электрической энергией потребителей при минимальных капитальных затратах. Для решения подобных оптимизационных задач используют, к примеру, эвристические методы оптимизации [1, 2] или динамическое программирование [3–5]. Применение этих методов оптимизации в данной сфере оказалось точным и эффективным лишь для краткосрочного планирования и в режиме реального времени.

В [6, 7] приведено исследование распределенной генерации на основе ВИЭ с системами хранения энергии на нерегулируемых рынках с помощью генетического алгоритма, который при этом показал хорошие результаты. Разработанная модель испытывалась на стандартной модели сети IEEE с 34 узлами (Япония). В качестве временных рамок рассматривалась долгосрочная перспектива. В целом можно сказать, что для решения оптимизационных задач на долгосрочную перспективу генетический алгоритм в сочетании со стандартным расчетом режимов является точным и эффективным инструментом при разработке и проектировании сети с использованием ВИЭ [1–7].

Создание и исследование методики оптимизированного проектирования, учитывающей многочисленные аспекты (конфигурацию сети, расчет режимов, учет долгосрочных прогнозов выработки ВИЭ и др.) и реализованной на основе генетического алгоритма, представляют собой интересную и актуальную задачу.

Структура исследуемой микросети показана на рис. 1.

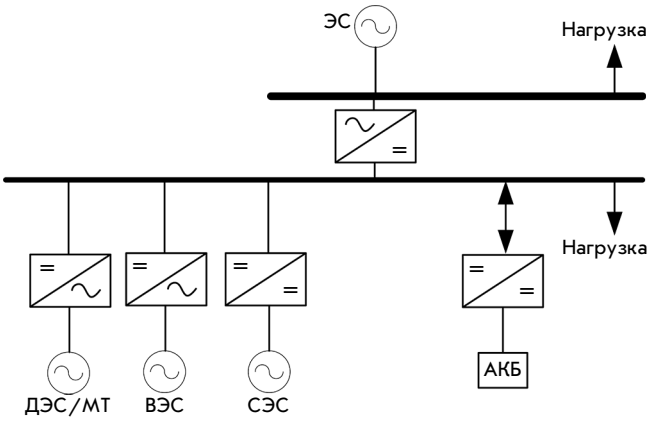


Рис. 1. Структурная схема микросети с ВИЭ

Методика оптимизированного проектирования

Основными критериями при проектировании микросетей с ВИЭ являются надежность электроснабжения потребителей в соответствии с их категорией надежности и снижение капитальных и эксплуатационных затрат.

Для решения задачи оптимизированного проектирования необходимо, чтобы методика проектирования решала следующие задачи:

– определяла мощности и расположение ВИЭ, батарей (АКБ), дизельных электростанций (ДЭС) или микротурбин (МТ);

– определяла конфигурацию и сечения межузловых связей и связей с энергосистемой;

– минимизировала капитальные и эксплуатационные затраты;

– поддерживала показатели качества электрической энергии в допустимых пределах.

При этом она должна учитывать следующие особенности:

– выработка электрической энергии непостоянна, поэтому необходимо учитывать долгосрочные прогнозы выработки ВИЭ;

– сечения необходимо определять исходя из установленной мощности ВИЭ, ДЭС/МТ и нагрузки.

Для учета перечисленных особенностей для каждого варианта, разрабатываемого алгоритмом проектирования, необходим расчет электрических режимов с использованием данных по долгосрочному прогнозированию выработки ВИЭ.

Для оптимизированного проектирования системы электроснабжения с распределенной генерацией (СЭРГ) понадобится не только работа генетического алгоритма, но и расчет режимов для выбора сечений и потерь. Поэтому методика оптимизированного проектирования будет состоять из двух взаимосвязанных алгоритмов, один из которых будет реализовывать генетический алгоритм, а другой – расчет режимов и оптимизацию режимов сети.

Критерии оптимизации

Как и для любого метода оптимизации, при использовании генетического алгоритма необходим критерий оптимизации. В рассматриваемом случае критерием оптимизации является минимизация затрат на строительство и эксплуатацию СЭРГ за рассматриваемый период. Критерии оптимизации затрат на строительство и эксплуатацию СЭРГ включают в себя:

– уменьшение капитальных затрат на строительство СЭРГ ($f1$);

– уменьшение затрат на первичные энергоносители ($f2$);

– уменьшение потерь мощности ($f3$): $\min\{f1 + f2 + f3\}$.

Методика

Методика проектирования включает в себя два взаимосвязанных алгоритма: генетический алгоритм и расчет режимов. Первым шагом алгоритма является ввод узлов и их координат. На основе этих данных определяются длины межузловых связей, формируются матрицы длин и сечений, задаются варианты сети (так называемые особи) для первого поколения. Далее для определения капитальных затрат на строительство линий и на потери при эксплуатации и для определения емкости АКБ необходим расчет режимов, при котором определяются сечения межузловых связей по критерию $n-1$. Также при расчете режимов определяются потери электрической энергии за рассматриваемый период. По результатам расчета выбираются емкости АКБ для сглаживания флуктуации электрической энергии.

Далее производится расчет режимов по уточненным данным о сечениях электропередач и емкости АКБ и по результатам определяется выживаемость вариантов. Под выживаемостью подразумевается близость к экстремуму целевой функции (выживаемость тем выше, чем больше близость к минимуму целевой функции). Если режим расходится, то выживаемость данного варианта принимается равной нулю.

После расчета режимов для выживших особей определяются общие капитальные затраты. Из выживших особей формируется так называемая популяция, после чего запускается генетический алгоритм. Он осуществляет процессы естественного отбора, скрещивания и мутации, в результате чего формируются новые варианты на основе описанных операций и начинается новый цикл, который будет продолжаться до тех пор, пока не будет достигнут критерий оптимизации.

Расчет режимов для выбора сечений проводников

Одним из ключевых моментов, необходимых для работы алгоритма и обеспечивающих его точность, является расчет режимов. Алгоритмической основой для расчета режимов электрической сети по линейным узловым уравнениям был принят метод Гаусса, который отличается быстрой сходимостью и точностью. В расчете режимов осуществляется два режима расчета:

– генерация ветроустановок (ВЭУ) и солнечных электростанций (СЭС) минимальная;

– генерация ВЭУ и СЭС максимальная.

Для расчета максимального режима берется максимальный коэффициент выработки электрической энергии ВЭУ и СЭС из 12 месяцев. Для расчета минимального режима принимается, что генерация ВЭУ и СЭС равняется 0.

Для учета режимов осуществляется расчет потребляемой мощности в узле в зависимости от заданных для определенной особи матрицы мощностей.

Генетический алгоритм

В качестве модели генетического алгоритма изначально была принята модель GENITOR согласно [8]. Канонический алгоритм характеризуется:

– фиксированным размером популяции;

– фиксированной разрядностью генов;

– особи для скрещивания выбираются случайным образом;

– ограничений на тип кроссовера и мутации нет.

Перед началом реализации генетического алгоритма оценивается выживаемость особи на основе капитальных затрат, которые были высчитаны в зависимости от сечений проводников, объемов установленной генерации в узлах, емкости АКБ и потерь. Выживаемость определяется по формуле:

$$\mathrm{pr}(i)=\frac{1/\mathrm{kap}(i)}{\mathrm{sum}}100\ \%, \qquad (1)$$

где kap(i) – капитальные затраты i-й особи;

sum – сумма обратной величины капитальных затрат, вычисляемая как

$$\mathrm{sum}=\sum_{i=1}^{4}\mathrm{kap}(i). \qquad (2)$$

Выражения (1) и (2) подтверждают, что чем меньше капитальные затраты, тем больше выживаемость особи.

После определения выживаемости начинается так называемый процесс скрещивания. Скрещивание осуществляется между двумя парами особей (особи выбираются случайным образом, но при этом учитывается выживаемость). У особи, выживаемость которой выше, больше шансов участвовать в скрещивании. Для выбора особи определяется случайное число от 0 до 100 (пример на рис. 2).

После определения скрещиваемых особей выявляется точка раздела для обмена генами для матрицы межузловых связей и матрицы мощностей и осуществляется обмен генами, то есть формируются два так называемых потомка от двух родителей (рис. 3).

После скрещивания у потомков осуществляется мутация с заданной вероятностью. Мутация заключается в замене любого элемента на противоположное значение: $0 \to 1$, $1 \to 0$.

После этого осуществляется процесс выбора сечений, выбора емкости, АКБ, расчета потерь и капитальных затрат. Если капитальные затраты потомка меньше капитальных затрат родителя, то оставляем потомка в качестве новой особи. В случае, когда капитальные затраты потомка выше, чем у родителя, в качестве особи принимаем родителя, а не потомка.

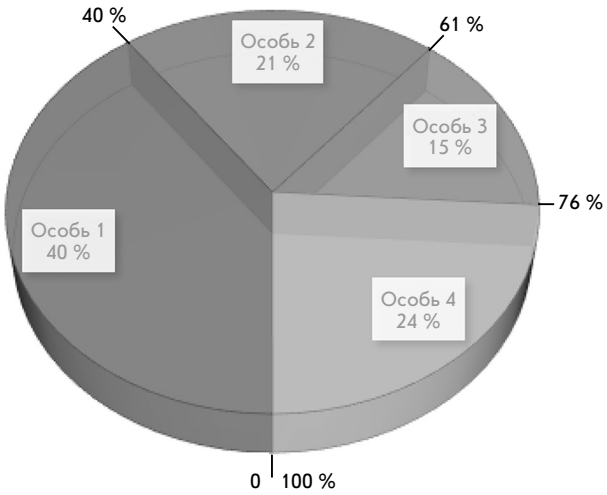


Рис. 2. Пример распределения выживаемости

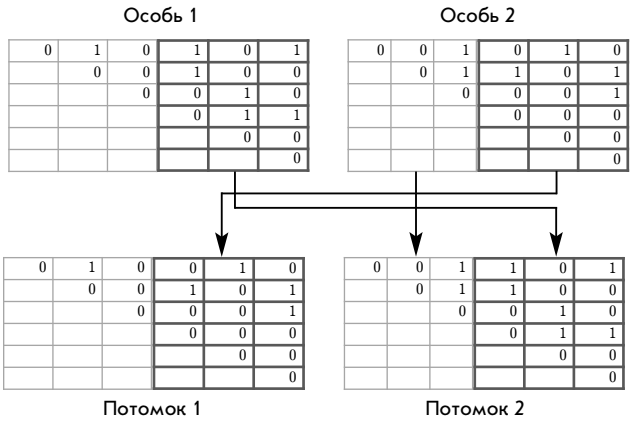


Рис. 3. Поясняющий пример для скрещивания

Описанные выше процессы осуществляются до определенной сходимости, заданной пользователем.

Апробирование разработанного алгоритма оптимизированного проектирования

Для экспериментальной поверки работы алгоритма и реализующей его программы рассмотрим его использование на территории Республики Башкортостан с использованием долгосрочных прогнозов выработки ВИЭ. Проектируемая сеть относится к классу напряжения 10 кВ. Используются следующие источники энергии: дизель-генераторы, микротурбины, ветроустановки и солнечные электростанции. В качестве межузловых связей рассматриваются три типа кабелей, параметры которых показаны в табл. 1. Удельная стоимость электрической энергии от различного оборудования приведена в табл. 2. В табл. 3 показаны исходные данные по узлам, где x и y – координаты узлов.

Таблица 1

Удельная стоимость кабелей

Сечения кабельных линий 10 кВ, мм^2	Стоимость, тыс. руб./км	Удельное активное сопротивление, Ом/км	Удельное активное сопротивление, Ом/км	Допустимый ток, А
3(1×95/35)	1300	0,3200	0,1110	253
3(1×150/35)	1400	0,2080	0,1430	322
3(1×500/50)	1600	0,0605	0,1250	614

Таблица 2

Удельная стоимость производства электрической энергии

Тип источника	Стоимость, руб./кВт·ч
ДЭС	11,91
МТ	12,75
ВЭУ	10
СЭС	8
Энергосистема	2,9

Таблица 3

Исходные данные для тестирования алгоритма

Количество узлов *N*	*x*	*y*	Мощность нагрузки $S_{нагр}$, кВт	
1	0	0	1	0,484
2	5	4	2	0,968
3	2	2	3	1,452
4	−1	−5	2	0,968
5	1	1	1	0,484
Балансирующий узел БУ1	−8	−9		
Балансирующий узел БУ2	10	2		

Далее протестируем работу алгоритма с использованием модели GENITOR без контроля выживаемости, то есть когда потомок в любом случае формирует популяцию в следующем поколении, если даже его выживаемость ниже, чем у родителя. Также не учитывается мутация.

Работа алгоритма и значения целевой функции показаны на рис. 4 и 5. В случае без контроля выживаемости (рис. 4) не наблюдается однородное снижение целевой функции: целевая функция то повышается, то понижается.

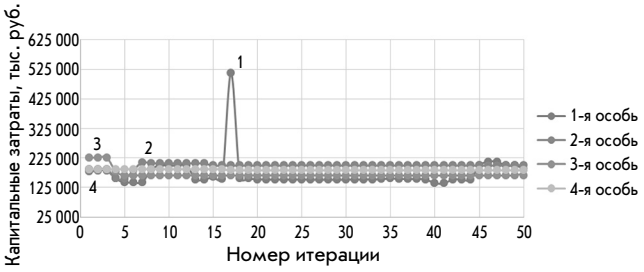


Рис. 4. Зависимость целевой функции особей от итераций без мутации и контроля выживаемости

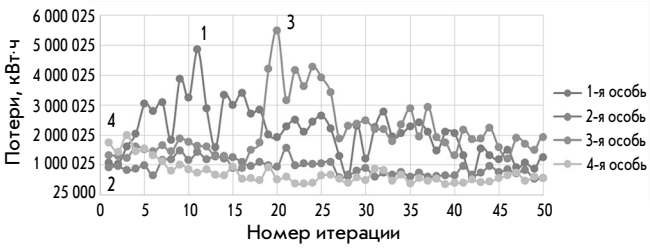


Рис. 5. Зависимость потерь в сети от итераций без мутации и контроля выживаемости

Далее рассмотрим случай, когда в генетическом алгоритме реализована функция контроля выживаемости, но не реализован алгоритм мутации. В данном случае в целевой функции не должен наблюдаться положительный рост, так как контроль выживаемости не дает потомкам с меньшими капитальными затратами, чем у родителей, выживать. Результаты расчета показаны на рис. 6 и 7.

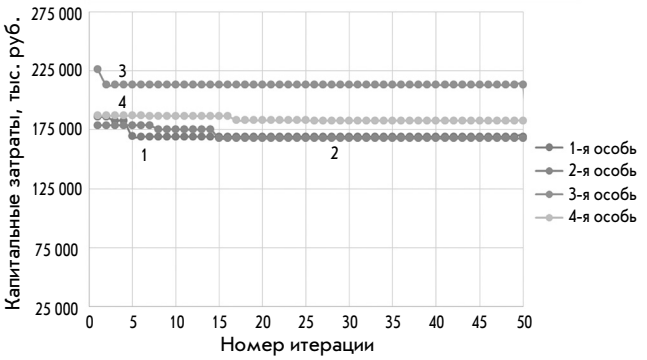


Рис. 6. Зависимость целевой функции особей от итераций без мутации

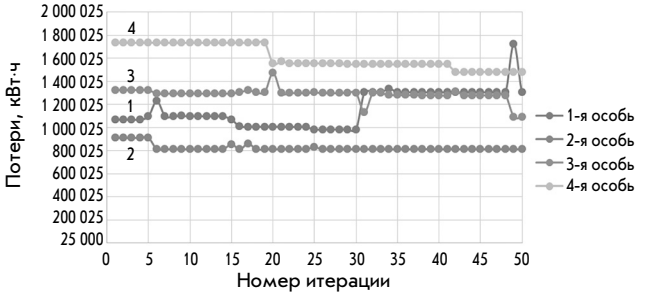


Рис. 7. Зависимость потерь в сети от итераций без мутации

Согласно рис. 6 и 7, как и ожидалось, целевая функция не имеет тенденции роста на всем протяжении работы методики. Контроль выживаемости позволяет устранить расходимость методики. Минимальное значение целевой функции составляет 155 415 тыс. руб. при 50 итерациях. Потери в сетях не имеют определенной закономерности.

Рассмотрим влияние вероятности мутации на эффективность работы алгоритма. Результаты расчетов представлены на рис. 8. Видно, что применение 30–40 % мутации дает наибольшую эффективность.

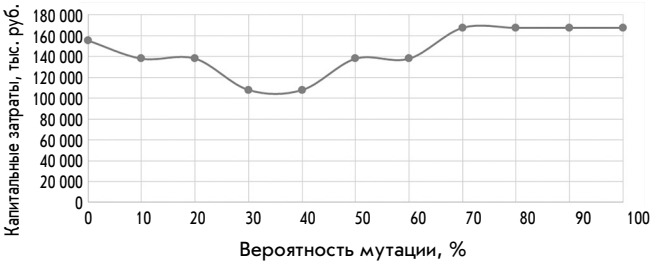


Рис. 8. Зависимость минимума целевой функции от вероятности мутации

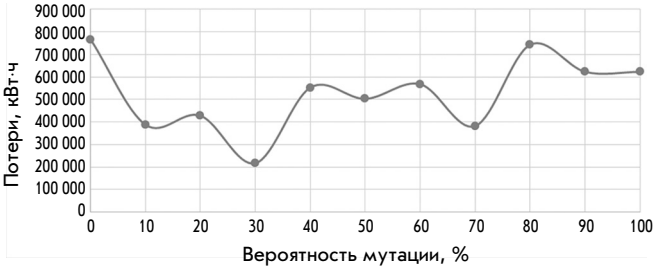


Рис. 9. Зависимость потерь в сети от вероятности мутации

На рис. 9 показана зависимость суммарных электрических потерь. Минимум суммарных потерь для оптимального варианта наблюдается при вероятности мутации 30 %. При этом для рассматриваемых исходных данных получен минимум капитальных затрат в 107 904 тыс. руб. и потери в 217 тыс. кВт·ч.

На рис. 10 и 11 показаны результаты, полученные при 30 % мутации, сходимость была достигнута при 22 итерациях.

Можно считать, что для решения задач оптимизированного проектирования систем электроснабжения с распределенной генерацией и возобновляемыми источниками энергии использование генетических алгоритмов является эффективным подходом, который позволяет выявить оптимальные варианты построения системы уже на 40-й итерации. При этом в генетическом алгоритме необходимо применять контроль выживаемости, который не позволяет потомкам с выживаемостью ниже, чем у родителей, участвовать в эволюции. Это обусловлено тем, что без применения контроля выживаемости при оптимизированном проектировании не наблюдается тенденция к снижению целевой функции.

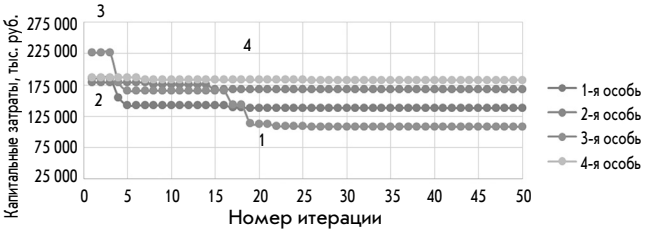


Рис. 10. Зависимость целевой функции особей от итераций с мутацией 30 %

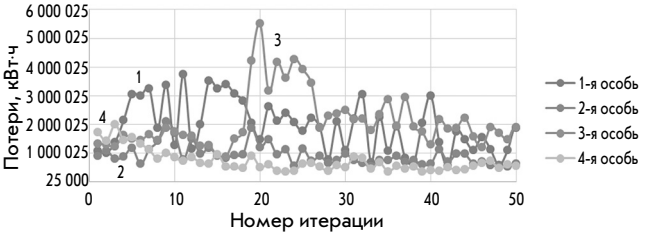


Рис. 11. Зависимость потерь в сети от итераций с мутацией 30 %

Наиболее эффективными значениями вероятности мутации для работы программного комплекса при решении задач оптимизированного проектирования систем электроснабжения с распределенной генерацией и возобновляемыми источниками энергии являются 30–40 %, а с учетом полученной зависимости потерь от вероятности мутации наиболее эффективной является вероятность 30 %.

Дальнейшими направлениями представленных исследований станут анализ и оптимизированное проектирование различных конфигураций систем распределенной генерации с ВИЭ с разными внешними параметрами и внедрение разработанного программного комплекса.

Литература

1. Bai H., Miao S., Ran X., Ye C. Optimal dispatch strategy of a virtual power plant containing battery switch stations in a unified electricity market, Energies, 2015, no. 8(3), pp. 2268–2289. https://doi.org/10.3390/en8032268.

2. Косенко Е. Ю. Системные аспекты оптимизации функционирования территориально распределенных энергетических систем / / Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 2. – С. 232–236.

3. Rigo-Mariani R., Sareni B., Roboam X., Turpin C. Optimal power dispatching strategies in smart-microgrids with storage, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, vol. 40, pp. 649–658. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.138.

4. Веселов Ф. В., Волкова Е. А., Курилов А. Е., Макарова А. С., Хоршев А. А. Методы и инструментарий прогнозирования развития электроэнергетики / / Известия российской академии наук. Энергетика. – 2010. – № 4. – С. 82–94.

5. Лежнев А. В. Динамическое программирование в экономических задачах. – М., Бином, 2012. – 179 с.

6. Atia R., Yamada N. More accurate sizing of renewable energy sources under high levels of electric vehicle integration, Renew. Energy, 2015, vol. 81, pp. 918–925. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.010.

7. Atia R., Yamada N. Distributed renewable generation and storage system sizing based on smart dispatch of microgrids, Energies, 2016, no. 9(3). https://doi.org/10.3390/en9030176.

8. Whitley L. D. The GENITOR algorithm and selection pressure: Why rank-based allocation of reproductive trials is best, ICGA, 1989, pp. 116–123.

Distributed renewable generation microgrid optimal design

F. R. Ismagilov,
Ufa State Aviation Technical University,
head of the Department of electromechanics,
Doctor of Science, professor

I. Kh. Khairullin,
Ufa State Aviation Technical University,
Department of Electromechanics,
Doctor of Science, professor

V. E. Vavilov,
Ufa State Aviation Technical University,
Department of Electromechanics, PhD

A. M. Yakupov,
Ufa State Aviation Technical University,
Department of Electromechanics,
BESK Engineering, engineer

G. F. Yakupova,
Ufa State Aviation Technical University,
Department of Electromechanics,
Bashkirenergo, engineer

Distributed renewable project development faces multiobjectives including lowest investment cost and lowest power losses. In order to plan optimal sizing of distributed renewable generation microgrids, we proposed and researched application of a genetic algorithm. Genetic Algorithm (GA) is a promising artificial intelligence random search algorithm which is optimized based on a natural genetic rule. As for the considered distributed renewable project, the lowest investment cost was set as the objective function, The variables to be determined were the number and configuration of branches and the capacities of distributed generation sources. The proposed algorithm has been tested by developing the system with wind turbines, solar power, microturbines, and diesel generators.

Keywords: *renewables, genetic algorithm, microgrid, design.*

DOI 10.18635/2071-2219-2018-3-27-29

The energy-efficient controlled resonance mode for electromechanical systems

S. N. Reshetnyak,
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, PhD, senior researcher

Energy efficiency in the mining industry aims to reduce costs of exploration, mining, and mineral processing. Putting mining equipment cutters in controlled resonance is an efficient way to increase overall equipment performance. This method is able to significantly reduce electrical energy consumption and increase drilling speed. As electromechanical systems are controllable under a wide range of operating modes by flexible adjustment of specific operating parameters, two options of PID controller adjustment have been proposed in this paper. It is recommended to pay special attention to the first option of PID controller settings by adjusting its proportional and derivative parts to create an electromechanical resonance mode for mining cutters.

Keywords: *mining, electromechanical system, resonance, energy efficiency, PID controller.*

Introduction

Energy efficiency in the mining industry aims to reduce costs of exploration, mining, and mineral processing. One of the most innovative ways in energy efficiency research applicable to the mining industry is energy modeling based on neural networks [1]. Energy modeling uses topology matrices containing essential information about equipment states, including real-time data [2]. Development of an electromechanical system based on neural network principles is able to significantly improve diagnostics of mining equipment [3, 4].

All electromechanical systems of mining machines are fully controllable under a wide range of operating modes by flexible adjustment of specific operating parameters to achieve maximum performance and reduce power consumption. In order to maintain proper power quality, it is required to eliminate influence of high harmonic generation in power supply of mining and ensure electromagnetic compatibility [5–7].

Controlled resonance

Putting mining equipment cutters in controlled resonance is an efficient way to increase overall equipment performance. As an example, testing of drilling rigs, model SBSH-250MN, under controlled resonance shows 22 % increase in performance and 31.6 % decrease in power consumption. Mathematical modeling helps predict energy efficiency of various methods of electric drive control during a drilling rock process and estimate mining mill dynamic load [8].

An analysis of resonance controlling modes of mining cutters under external disturbance shows that the most efficient control structure is that containing strict and flexible current feedback. Flexible motor current feedback helps adjust resonant frequency to external disturbance [9]. Negative current feedback ensures limitation and control of forced oscillation amplitude and motor speed in order to reduce dynamic load applied to the kinematic chains of mechanisms.

Today, frequency converters controlling cutters' speed are based on PID controllers to allow various control ways. In opposite to the control way discussed in [9], there is a simplified control system based on a PID controller. One motor current feedback can be used provided that strict and flexible feedbacks are formed by a regulator itself.

A structural diagram demonstrating the proposed control system is shown in Fig. 1.

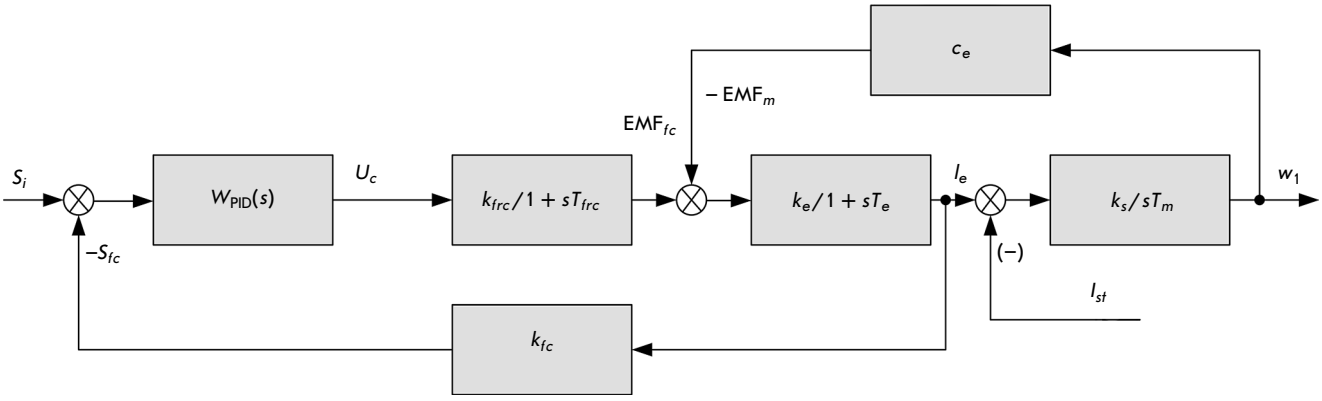


Figure 1. Structural diagram of frequency-controlled electric drive with a PID controller

Nomenclature:

S_i – reference signal;
$-S_{fc}$ – motor current feedback signal;
$W_{\text{PID}}(s)=k_p+\frac{1}{sT_I}+sT_D$ – transfer function of a PID controller;
s – differential operator;
k_p – transfer factor of a regulator;
T_I – time constant of a regulator integral part;
T_D – time constant for a regulator derivative part;
U_c – control signal to a frequency converter;
k_{frc} – static transfer factor for a frequency converter;
T_{frc} – time constant for a frequency converter;
k_e – motor current ratio;
T_e – the electromagnetic time constant of a frequency converter and motor;
i_e – motor current;
k_s – transfer factor of motor speed;
T_m – electromechanical time constant;
w_1 – phase change rate of a motor shaft;
c_e – internal feedback of motor EMF;
k_{fc} – current feedback ratio;
$i_{st}=I_{st}\sin\upsilon\omega t$ – external disturbance, i.e. harmonic oscillations of static current;
I_{st} – static current amplitude;
υ – harmonics of angular frequency of external disturbance.

In accordance with Fig. 1, current transfer with respect external disturbance (the converter time constant is being neglected) is as follows:

$$\frac{i_e(s)}{i_s(s)}=\frac{1}{s^2(T_eT_m+T_mT_{fc})+sT_m(1+k_{hc}k_p)+(1+T_mk_{hc}\tau_i)}, \quad (1)$$

where $T_{fc}=k_{hc}T_D$ is the time constant of motor current flexible feedback;
$k_{hc}=k_ek_{frc}k_{fc}$ is motor current negative feedback;
$\tau_i=1/T_I$ is inverse of the time constant of a PID controller integral part.

The dynamic index of motor current in a resonant mode is

$$k_{Di\,\text{res}}=\frac{\upsilon^2(1+2nT_{fc})}{2n\sqrt{k_{hc}^2\tau_i^2+\upsilon^2(1+k_{hc}k_p)^2}}, \quad (2)$$

where $n=1/2T_e$ is the damping factor of vibrations.

There are three types of parameters able to control the dynamic factor: T_{fc}, τ_i, and k_p.

The time constant T_{fc} is essential to adjust external disturbance to resonance frequency. As for the other two parameters, one of them is quite redundant as long as the only one is sufficient to map motor current forced oscillation amplitude.

To exclude an integral part of a PID controller and to use proportional and derivative parts only,

$$k_{Di\,\text{res}}=\frac{\upsilon(1+2nT_{fc})}{2n(1+k_{hc}k_p)}. \quad (3)$$

If integral and derivative parts are only used, the equation (3) can be written as follows

$$k_{Di\,\text{res}}=\frac{\upsilon^2(1+2nT_{fc})}{2n\sqrt{k_{hc}^2\tau_i^2+\upsilon^2}}. \quad (4)$$

To investigate the first option of PID controller adjustment (3), settings of a derivative part of a PID controller were obtained for different values of external disturbance for a number of harmonics (Fig. 2) and then created motor current negative feedback depending on disturbance frequencies (Fig. 3).

It is impossible to adjust a regulator to resonant frequency, except for the first harmonic, at disturbance frequencies from 15 to 30 rad/sec as time constant values of a PID controller derivative part are located in the negative part.

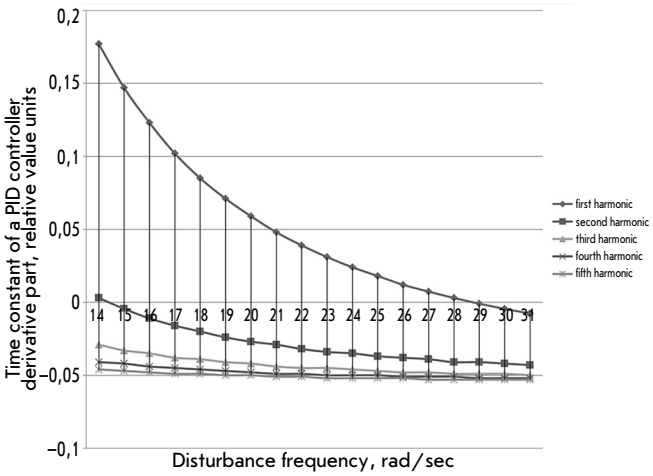


Figure 2. Dependence of the time constant of a PID controller derivative part on disturbance frequency

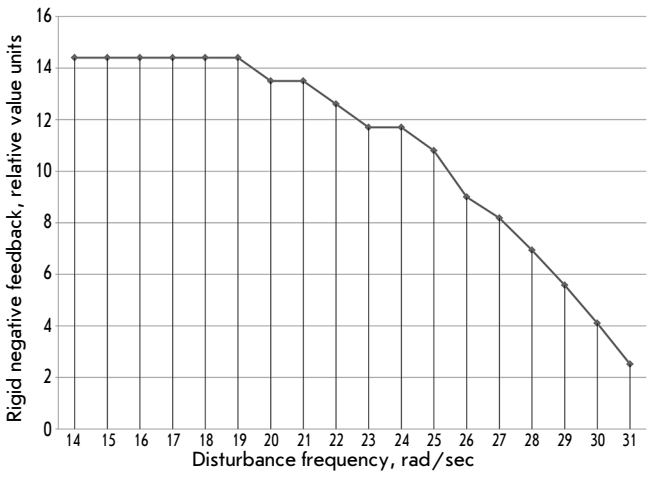


Figure 3. Rigid negative feedback dependence on disturbance frequency

Conclusion

Two options of PID controller adjustment have been proposed in order to achieve an energy-efficient controlled resonance mode for mining cutters as electromechanical systems. The results of an analysis under a wide range of disturbance levels reflect that the proposed PID controller settings for an electromechanical resonant mode are limited to disturbance frequencies not exceeding 7 rad/sec. Therefore, it is recommended to pay attention to the first option of PID controller settings by adjusting its proportional and derivative parts to create an electromechanical resonance mode for mining cutters.

The discussed energy-efficient controlled resonance mode for mining equipment is promising for use in rock drilling. This method is able to significantly reduce electrical energy consumption and increase drilling speed along with overall mining equipment performance.

References

1. Petrochenkov A. B. An energy-information model of industrial electrotechnical complexes, Russian Electrical Engineering, 2015, vol. 86, no. 6, pp. 692–696. https://doi.org/10.3103/S1068371214110108.

2. Babokin G. I., Shpreher D. M. Neural network technology for diagnostics of electromechanical systems of mining machines, Mining Journal, 2011, no. 3, pp. 39–44.

3. Babokin G. I., Shpreher D. M. The use of neural networks for the diagnosis of electromechanical systems, Mining Information and Analytical Bulletin, 2011, no. 4, pp. 132–139.

4. Osipov O. I., Babkin E. A., Shevyrev Y. V. Energy indicators of the electrotechnical complex of a drilling rig, MPEI Vestnik, 2010, no. 1. pp. 42–45.

5. Shevyrev Y. V. Improving the quality of electrical energy in networks with semiconductor converters, Mining Information and Analytical Bulletin, 2011, no. 4, pp. 234–241.

6. Shevyrev Y. V., Morgachev D. A. Investigation of electromagnetic compatibility of a diesel power plant and the main electric drive of a drilling rig, Gornyi Zhurnal, 2015, no. 1, pp. 62–66.

7. Shevyrev Y. V., Morgachev D. A. Investigation of electromagnetic compatibility of a variable-frequency electric drive of a drilling rig and an electric power source of commensurate power, Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering, 2015, no. 2, pp. 25–33. https://doi.org/10.14529/power150204.

8. Safonov Yu. M., Blagodarov D. A., Shevyrev Yu. V., Olivetsky I. N. Influence of frequency-regulated electric drive on dynamic loads in a column of drill pipes during geological exploration drilling, News of the Tula State University. Technical Sciences, 2010, no. 3, pp. 235–239.

9. Fashilenko V. N., Reshetnyak S. N. Energy efficient resonant mode of electromechanical system mining machines based on management structures with PID-controller, Reports of the 23rd International Scientific Symposium “Miner's Week”, 2015, pp. 608–612.

УДК 316.334.5 DOI 10.18635/2071-2219-2018-3-30-35

Энергосберегающее поведение населения России и других европейских стран

В. А. Прохода,
кандидат социологических наук,
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
старший научный сотрудник;
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации,
доцент департамента социологии, истории и философии

Анализируются результаты межстранового социологического исследования вовлеченности жителей европейских стран в энергосберегающие практики. Исследование проводилось в форме опроса среди населения в возрасте 15 лет и старше, с разным уровнем образования и доходов. Страны ранжированы по частоте проявления энергосберегающего поведения, уровню культуры энергосбережения жителей и их осведомленности о способах экономии энергии. Результаты показали, что по масштабам бытового энергосберегающего поведения Россия существенно выделяется на общеевропейском фоне, и не с лучшей стороны. Констатируется, что сложившаяся в России система энергосберегающего воспитания населения требует совершенствования. Соотнесение полученных ответов с социально-демографическими характеристиками опрошенных позволило также установить некоторые факторы, влияющие на энергосберегающее поведение населения.

Ключевые слова: *энергоресурсы, энергоэффективность, энергосберегающее поведение, культура энергопотребления.*

Вопросы повышения энергоэффективности экономики, широкого использования возобновляемых источников энергии, развития потребительского рынка энергосберегающих приборов активно обсуждаются на официальном уровне, в среде ученых и специалистов [1–3]. Внедряются энергосберегающие мероприятия разного уровня [4], распространенными становятся практики закрепления энергосберегающих технологий на уровне законодательства. В России развитие энергосбережения и повышение энергоэффективности декларируется в качестве одного из приоритетов государственной политики. На фоне большого количества литературы, освещающей вопросы технического прогресса в области внедрения энергосберегающих технологий, организационных и технических аспектов мирового опыта, ощущается дефицит публикаций, посвященных рассмотрению масштабов и особенностей энергосберегающего поведения населения в быту. При реализации энергосберегающих мероприятий важно учитывать тот факт, что наличие новых технологий не обязательно означает их автоматическое принятие жителями. Максимальный эффект подобные мероприятия приносят только в случае их полноценной поддержки населением, когда каждый в своей повседневной жизни предпринимает действия, направленные на рациональное использование энергетических ресурсов. Это подразумевает формирование среди широких слоев населения соответствующей культуры энергопотребления.

Популяризация энергосбережения и повышения энергетической эффективности среди различных групп населения осуществляется, прежде всего, путем информационного обеспечения. Информационное обеспечение закреплено в Федеральном законе № 261 «Об энергосбережении...». Оценка эффективности проводимых мероприятий актуализирует необходимость изучения общественного мнения.

Формой обратной связи в рамках такой деятельности выступают социологические опросы. Они позволяют рассмотреть проблему энергосбережения в контексте социальных установок и поведения населения. Необходимость выявления и использования передовых практик и учета неудач предполагает возможность сравнения имеющегося международного опыта, в том числе сквозь призму общественного мнения. Это требует обращения к результатам сравнительных социологических проектов. Одновременно можно отметить определенный дефицит не только межстрановых, но и общероссийских социологических исследований, посвященных проблеме энергосбережения. На этом фоне представляется интересным обратиться к результатам масштабного межстранового социологического проекта, затрагивающего рассматриваемую проблематику.

Целью представленной работы является определение масштабов вовлеченности жителей европейских стран в энергосберегающие практики, а также выявление факторов, влияющих на энергосберегающее поведение населения. Публикация базируется на данных восьмой волны социологического исследования «Европейское социальное исследование» (ESS), проведенного в 2016 г. ESS – это проект, в рамках которого с 2002 г. проводится многолетнее сравнительное изучение установок,

взглядов, ценностей и поведения населения европейских стран (Россия участвует в ESS с 2006 г.).

Опрос проводился в странах Европы среди населения в возрасте 15 лет и старше по репрезентирующей население выборке. Выборка составила от 880 человек в Исландии до 2852 человек в Германии. Метод сбора первичной социологической информации – личное интервью (*face-to-face*) на дому у респондентов. В России опрос проведен ЦЕССИ (Институтом сравнительных социальных исследований) в октябре 2016 – январе 2017 г., размер выборки составил 2430 респондентов. На международном уровне проект координируют сотрудники Лондонского городского университета (City, University of London) и шести других европейских научных организаций: NSD (Норвегия), GESIS (Германия), Нидерландского института социальных исследований (Нидерланды), университета Помпеу Фабра (Испания), Левенского университета (Бельгия), Люблянского университета (Словения). В настоящей статье анализируются данные по 17 странам.

Многообразие способов снижения бытового энергопотребления и сложность с измерением регулярности различных видов такого поведения обусловили использование в опросном инструментарии прямого вопроса самооценки. Для выявления масштабов распространения бытового энергосберегающего поведения респонденту задавали вопрос, как часто в своей повседневной жизни он предпринимает что-либо для снижения энергопотребления. В предисловии к вопросу специально оговаривалось, что подразумеваются различные способы снижения энергопотребления. Предусматривались шесть вариантов ответа: «никогда», «очень редко», «иногда», «часто», «очень часто», «всегда». Для повышения наглядности варианты ответов можно объединить в три категории:

1) «никогда, очень редко»;

2) «иногда»;

3) «часто, очень часто, всегда» (в дальнейшем условно именуется «часто»).

При необходимости интервьюером дополнительно фиксировался вариант «не вижу возможности снизить энергопотребление». Вынужденным недостатком реализованного подхода является относительность используемых вариантов ответа; важно учитывать и возможность некоторого смещения в ответах респондентов, связанного с социальным одобрением энергоэффективного использования ресурсов.

Исследование показало, что по масштабам бытового энергосберегающего поведения Россия существенно выделяется на общеевропейском фоне (рис. 1). Среди россиян фиксируется самый низкий процент (45,8 %) респондентов, практикующих энергосбережение часто. В окружении России с большим отрывом оказались Чехия и Исландия. Одновременно среди россиян выше доля респондентов, которые очень редко предпринимают действия, направленные на снижение энергопотребления, или никогда не практикуют энергосбережение, – 22,3 %. Это в 6 раз больше, чем в Германии и Финляндии, и более чем в 4 раза превышает процент во Франции, Словении и Бельгии. К числу стран – лидеров по масштабам вовлеченности населения в бытовое энергосбережение относятся Германия, Франция, Словения. Для удобства восприятия на рис. 1 не отображаются малочисленные «технические» категории ответов, такие как «затрудняюсь ответить», «не вижу возможности снизить электропотребление».

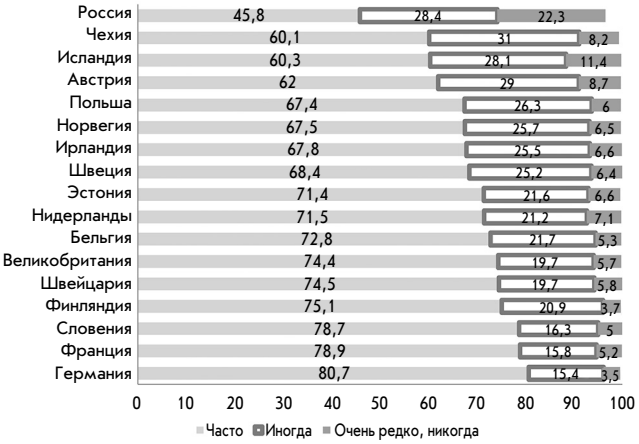


Рис. 1. Распределение ответов на вопрос о том, как часто респонденты делают в повседневной жизни что-либо для снижения энергопотребления (процент опрошенных в каждой стране)

Таким образом, имеет место некоторое противоречие: с одной стороны, в официальных документах декларируется необходимость создания в России правовых, экономических и организационных основ стимулирования энергосбережения и повышения энергетической эффективности, ставится задача реализации механизмов, стимулирующих энергосбережение, обеспечивающих активизацию деятельности населения и бизнеса по реализации потенциала энергосбережения и повышения энергетической эффективности (в частности, в государственной программе «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года»). С другой стороны, в стране фиксируются одни из самых низких в Европе показателей вовлеченности населения в энергосберегающие практики.

Одной из возможных стратегий снижения потребления энергии является приобретение энергоэффективных приборов. Для выявления установок на энергосбережение респондентам задавался проективный вопрос о том, насколько вероятно, что при совершении покупки крупной бытовой техники для дома они бы выбрали одну из самых энергоэффективных моделей. Для ответа предлагалась шкала от 0 баллов («совсем невероятно») до 10 баллов – («чрезвычайно вероятно»). Отметим, что россияне ориентированы на покупку энергоэффективной техники меньше (средний балл равен 6,31), чем население других европейских стран. Для сравнения аналогичный показатель в Германии составил 8,46, в Польше 8,18, в Швейцарии 8,17, в Австрии 8,03, в Бельгии 8,03 балла.

Возможны различные варианты объяснения полученных результатов. Такое различие может быть следствием низкого уровня экологической культуры населения, связанным, в том числе, с недостаточным информированием о рациональном использовании энергоресурсов. Ограничивающим фактором с учетом более высокой стоимости современных энергоэффективных приборов может выступать уровень материального положения респондента. Наконец, определенное влияние оказывает и стоимость энергетических ресурсов в стране.

В условиях множественной детерминированности бытового энергосбережения особый интерес представляет выявление факторов, влияющих на рациональное потребление энергетических ресурсов. Исследование показало, что во всех странах энергосберегающее поведение статистически значимо связано (здесь и далее – ранговая корреляция Спирмена) с возрастом респондентов (табл. 1). Иными словами, чем старше возраст опрошенных, тем чаще они отмечают практики энергосберегающего потребления. При этом в России коэффициент корреляции достигает максимальных значений. Связь с возрастом в России весьма устойчива, что подтверждается результатами других исследований [5].

Дополнительную информацию позволяют получить процентные распределения. Только менее трети (32,9 %) россиян в возрасте от 15 до 30 лет демонстрируют энергосберегающее поведение часто. В возрастной группе от 31 года до 50 лет таких оказалось 43,8 % респондентов. А среди представителей старшей возрастной группы (51 год и старше) уже большинство (57,2 %) опрошенных констатирует частое обращение к энергосберегающим практикам. Таким образом, повсеместно в Европе молодежь оказывается в числе категорий населения, среди которых энергосберегающее поведение наименее распространено. Получается, что молодое поколение менее ориентировано на приоритеты энергосбережения, и в России это выражено особенно сильно. Исследователи отмечают, что российские информационные кампании малоэффективны среди молодых россиян в силу комплекса причин: из-за ассоциации энергосберегающего поведения с тактикой систематического самоограничения, возрастных особенностей аудитории, доминирующего в молодежной среде отношением к энергоресурсам как к легкодоступным и неисчерпаемым [6].

Таблица 1

Наличие / отсутствие корреляционной связи между частотой энергосберегающего поведения и социально-демографическими характеристиками респондентов (коэффициент ранговой корреляции Спирмена, статистическая значимость)

Страна	Образование	Возраст	Материальное положение
Австрия	0,094 ($p \leq 0{,}01$)	0,123 ($p \leq 0{,}01$)	Связь отсутствует
Бельгия	0,064 ($p \leq 0{,}01$)	0,174 ($p \leq 0{,}01$)	Связь отсутствует
Великобритания	0,109 ($p \leq 0{,}01$)	0,051 ($p \leq 0{,}05$)	Связь отсутствует
Германия	0,111 ($p \leq 0{,}01$)	0,161 ($p \leq 0{,}01$)	−0,059 ($p \leq 0{,}01$)
Ирландия	0,107 ($p \leq 0{,}01$)	0,074 ($p \leq 0{,}01$)	Связь отсутствует
Исландия	Связь отсутствует	0,121 ($p \leq 0{,}01$)	Связь отсутствует
Нидерланды	0,098 ($p \leq 0{,}01$)	0,228 ($p \leq 0{,}01$)	Связь отсутствует
Норвегия	0,056 ($p \leq 0{,}01$)	0,148 ($p \leq 0{,}01$)	−0,095 ($p \leq 0{,}01$)
Польша	0,125 ($p \leq 0{,}01$)	0,155 ($p \leq 0{,}01$)	Связь отсутствует
Россия	Связь отсутствует	0,243 ($p \leq 0{,}01$)	−0,127 ($p \leq 0{,}01$)
Словения	0,066 ($p \leq 0{,}01$)	0,155 ($p \leq 0{,}01$)	−0,087 ($p \leq 0{,}01$)
Финляндия	0,056 ($p \leq 0{,}01$)	0,104 ($p \leq 0{,}01$)	−0,067 ($p \leq 0{,}01$)
Франция	Связь отсутствует	0,175 ($p \leq 0{,}01$)	−0,102 ($p \leq 0{,}01$)
Чехия	0,093 ($p \leq 0{,}01$)	0,225 ($p \leq 0{,}01$)	−0,111 ($p \leq 0{,}01$)
Швейцария	0,074 ($p \leq 0{,}01$)	0,190 ($p \leq 0{,}01$)	−0,093 ($p \leq 0{,}01$)
Швеция	0,071 ($p \leq 0{,}01$)	0,059 ($p \leq 0{,}05$)	Связь отсутствует
Эстония	Связь отсутствует	0,190 ($p \leq 0{,}01$)	−0,157 ($p \leq 0{,}01$)

Актуализируется важность проведения специализированных мероприятий, направленных на формирование в молодежной среде социальных установок важности и необходимости процесса энергосбережения. Существует необходимость формирования образовательных программ в области энергосбережения на всех уровнях обучения.

Энергосберегающая компетентность рассматривается в качестве одной из базовых компетенций современного специалиста [6]. На этом фоне особый интерес представляет выявление зависимости между уровнем образования респондентов и частотой энергосберегающего поведения. С учетом

национальных различий в системах образования разных стран была применена пост-гармонизация данных по России в шкалу Международной классификации образования (ES-ISCED) [7].

Далее рассчитывался коэффициент корреляции между частотой энергосберегающего поведения и уровнем образования респондента. В большинстве европейских стран отмечается прямая корреляционная связь: чем выше уровень образования респондентов, тем чаще они демонстрируют энергосберегающее поведение. Зависимость от образования отсутствует только в четырех странах – Исландии, России, Франции и Эстонии. На фоне масштабов включенности населения в энергосбережение во Франции отсутствие зависимости означает, что люди с разным уровнем образования одинаково часто демонстрируют бережливое поведение; в России же респонденты как высокообразованные, так и с низким уровнем образования реже демонстрируют энергосберегающие практики. Остается констатировать, что отечественная система образования не производит в достаточной степени и не транслирует образцы энергосберегающего поведения. Сложившаяся система энергосберегающего воспитания населения требует совершенствования.

Существуют различные подходы к объяснению экологического поведения [8], включающего, в том числе, энергосбережение. Результаты немногочисленных отечественных социологических исследований показывают, что одним из мотивов такого поведения является снижение финансовых затрат [6, 9]. В европейских странах предусмотрены различные формы поддержки, связанные с материальным стимулированием энергосбережения, – дотации, субсидии, льготное кредитование, гибкие системы тарифов, налоговые льготы. В то же время исследователи справедливо отмечают, что энергосбережение нельзя рассматривать исключительно с позиции материальной выгоды, рентабельность энергосберегающих мероприятий должна интересовать преимущественно профессионалов, а обычный потребитель должен быть мотивирован к сбережению энергии не только желанием сэкономить [10].

В таком контексте интересно рассмотреть связь энергоэффективного поведения с материальным положением опрошенных. Для его выявления респондентам задавался вопрос о том, к какой группе принадлежит их семья по общему доходу всех членов семьи в месяц после вычета налогов. Поскольку уровень благосостояния населения европейских стран существенно варьируется, а национальные денежные единицы различаются, в каждой стране проводился расчет децилей. Проведенный корреляционный анализ показал, что европейские страны можно условно разделить на две представительные группы. В первой группе значимая связь энергосбережения с финансовым положением респондентов отсутствует. Во второй, включающей в том числе и Россию, имеет место обратная корреляционная зависимость (табл. 1). Это означает, что чем лучше материальное положение россиян, тем реже они демонстрируют энергосберегающее поведение. Если среди 10 % самых обеспеченных россиян частое обращение к практикам энергосбережения отмечает 37,2 % респондентов, то среди 10 % наименее обеспеченных – уже 57,2 %.

Можно предположить, что обеспеченные респонденты игнорируют энергосберегающее поведение именно в силу своего устойчивого финансового положения. Действие же других мотивационных факторов – защита окружающей среды, забота об обществе, демонстрация социальной ответственности и др. – выражено у них недостаточно сильно. Иными словами, материальный мотив у обеспеченных россиян выражен слабо, а культура ресурсосбережения не сформирована. Существенная роль материального фактора как мотива бытового энергосбережения подтверждается наличием корреляционной зависимости между масштабами включенности населения в энергосберегающие практики и степенью обеспокоенности респондентов тем, что электроэнергия является слишком дорогой для жителей страны. Из всех стран – участниц проекта статистически значимая связь отсутствует только в Нидерландах, Польше и Швейцарии. В остальных государствах чем больше обеспокоенность населения стоимостью электричества, тем чаще респонденты демонстрируют энергосберегающее поведение. Максимальное значение коэффициента корреляции фиксируется в России ($r = 0{,}253$; $p \leq 0{,}01$). В процентном выражении среди чрезвычайно обеспокоенных стоимостью электроэнергии россиян часто практикуют энергосберегающее поведение 59,8 % опрошенных, в то время как среди совсем не обеспокоенных респондентов таких оказалось только 28,7 %.

Таким образом, в современной России мотив материального стимулирования играет важную роль и может быть эффективно использован в пропаганде и популяризации энергосберегающего поведения, особенно среди средне- и малообеспеченных слоев населения. Однако использования только финансовых механизмов повышения энергоэффективности в современных российских условиях явно недостаточно. Ощущается необходимость выработки механизмов, направленных на формирование экологических ценностных ориентаций, разумного, бережного отношения к ресурсам.

В ходе исследования для выявления отношения респондентов к энергосбережению опрошенных просили указать свое отношение к принятию в стране проживания следующих мер для борьбы с изменениями климата:

– увеличение налогов на ископаемые источники энергии – нефть, газ, уголь;

– использование бюджетных средств для развития энергетики на основе возобновляемых источников, таких как ветровая и солнечная энергия;

– законодательный запрет на продажу бытовой техники с наименее эффективным энергопотреблением.

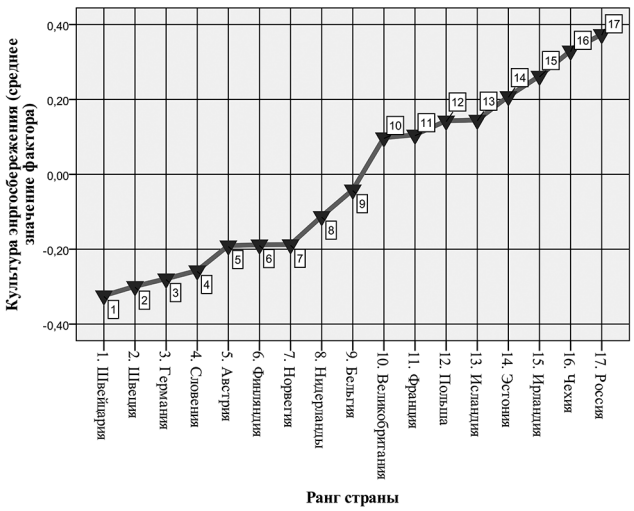


Рис. 2. Уровень культуры энергосбережения населения европейских стран (ранжирование по среднему значению фактора — чем выше уровень культуры энергосбережения населения страны, тем меньше ее ранг)

Проведенный факторный анализ (метод главных компонент, полная объясненная дисперсия 50,6 %; КМО = 0,611; критерий сферичности Бартлетта $p \leq 0{,}01$) показал возможность объединения всех трех переменных в интегративный показатель (фактор), условно названный «культурой энергосбережения». В дальнейшем страны – участницы ESS были ранжированы в порядке возрастания среднего значения полученного фактора. Чем выше уровень культуры энергосбережения населения страны, тем меньше ее ранг. Расположение стран в соответствии с их рангами представлено на рис. 2.

Высоким уровнем культуры энергосбережения характеризуется население Швейцарии, Швеции, Германии, Словении, Австрии. В числе аутсайдеров, занимая последние места в импровизированном списке, оказались Эстония, Ирландия, Чехия и, к сожалению, на последнем месте (ранг 17) Россия. Иными словами, в России по сравнению с другими странами фиксируется самый низкий уровень «культуры энергосбережения». Добавим, что во всех странах – участницах ESS фиксируется статистически значимая корреляционная зависимость между уровнем культуры энергосбережения и вовлеченностью населения в энергосберегающее поведение. В целом, чем выше уровень культуры, тем чаще население практикует энергосберегающее поведение. Максимальное значение коэффициента корреляции фиксируется в Финляндии ($r = -0{,}205$; $p \leq 0{,}01$), а минимальное – в Эстонии ($r = -0{,}060$; $p \leq 0{,}01$). Россия не является исключением на общеевропейском фоне ($r = -0{,}139$; $p \leq 0{,}01$).

Об уровне осведомленности населения о возможных способах экономии энергии отчасти позволяют судить данные о том, насколько респонденты уверены в том, что могли бы потреблять меньше энергетических ресурсов (рис. 3). Для ответа предлагалась шкала от 0 баллов («совсем не уверен») до 10 баллов («полностью уверен»). Далее применительно к каждой стране рассчитывался средний балл, характеризующий степень уверенности населения в возможностях энергосбережения. Полученные результаты свидетельствуют, что в целом население европейских стран имеет сложившееся представление о потенциале для снижения потребления энергетических ресурсов. Пожалуй, единственным исключением является ситуация в России, где фиксируется самый низкий средний балл среди всех государств – участниц проекта. В процентном соотношении только немногим более трети россиян (35,1 %) отмечает наличие дополнительных возможностей экономии энергоресурсов. Для сравнения во Франции таких респондентов оказалось 81,5 %, в Норвегии – 77,5 %, в Финляндии – 77 %, в Швейцарии – 75,3 %, в Швеции – 73,7 %, в Бельгии – 73,1 %. Таким образом, значительная часть населения России не видит для себя возможностей оптимизации энергопотребления.

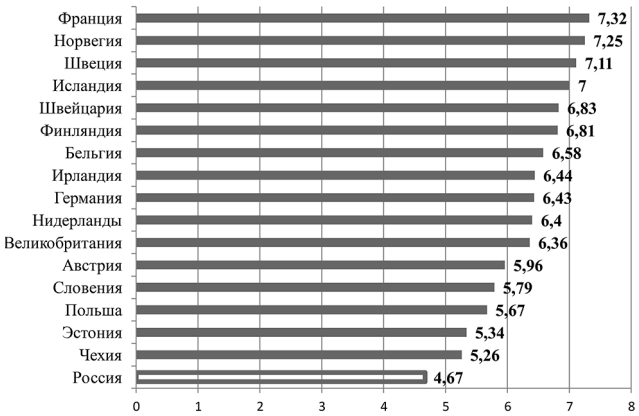


Рис. 3. Уверенность респондентов в возможности уменьшения потребления энергоресурсов, средний балл (от 0 баллов — «совсем не уверены» — до 10 баллов — «полностью уверены»)

Интересно, что в ряде стран (Франции, Швейцарии, Финляндии, Бельгии), характеризующихся большими масштабами вовлеченности населения в энергосбережение, большинство опрошенных отмечает наличие возможностей для дополнительной экономии, в то время как в России респонденты сравнительно редко демонстрируют энергосберегающее поведение и при этом не видят для себя возможностей уменьшения потребления энергоресурсов. Такие цифры могут свидетельствовать о низком уровне осведомленности россиян о возможных способах экономии энергии и преимуществах применения энергосберегающих технологий.

Результаты исследования позволяют констатировать, что в стране имеет место противоречие между декларируемой на официальном уровне важностью энергосбережения и низкими масштабами вовлеченности населения в этот процесс. К числу социально-демографических факторов, влияющих на интенсивность энергосберегающего поведения россиян, относятся возраст и материальное положение. Молодежь оказывается в числе категорий населения, сравнительно редко практикующих энергосберегающее

поведение, что актуализирует необходимость проведения мероприятий, направленных на формирование в молодежной среде представлений о важности и необходимости процесса энергосбережения.

В отличие от большинства стран – участниц проекта, в России отсутствует зависимость между уровнем образования респондентов и частотой энергосберегающих практик. Российская система образования не транслирует в достаточной степени образцы энергосберегающего поведения, не формирует мотивационные факторы, детерминирующие энергосбережение. Россияне по сравнению с жителями других европейских государств плохо осведомлены о возможных способах экономии энергии и преимуществах применения энергосберегающих технологий. В пропаганде и популяризации энергосберегающего поведения может быть эффективно использован мотив материального стимулирования, хотя использования только финансовых механизмов снижения энергопотребления в российских условиях недостаточно. Исследование показало, что в России по сравнению с другими европейскими странами фиксируется самый низкий уровень культуры энергосбережения. Необходима выработка более эффективных, чем имеющиеся в настоящее время, механизмов формирования ценностных ориентаций, связанных с бережным отношением к энергоресурсам и защитой окружающей среды.

Литература

1. Инновационная электроэнергетика-21 / Под ред. В. М. Батенина, В. В. Бушуева, Н. И. Воропая. – М.: Энергия, 2017. – 584 с.
2. Капцов В. А, Дейнего В. Н. Светодиодное освещение – вред здоровью или польза энергосбережению? Спор американских ассоциаций / / Энергосовет. – 2016. – № 3 (45). – С. 33–36.
3. Energy efficiency: A straight path towards energy sustainability [Электронный ресурс]. Код доступа: https://www.worldenergy.org/publications/2016/energy-efficiency-a-straight-path-towards-energy-sustainability.
4. Седаш Т. Н. Зарубежный опыт энергосбережения и повышения энергоэффективности в ЖКХ / / Вестник РУДН. Серия «Экономика». – 2013. – № 2. – С. 61–68.
5. Официальный информационный ресурс ФОМ [Электронный ресурс]. Код доступа: https://bd.fom.ru/report/map/az/%C4/dom0740/d074024.
6. Зеер Э. Ф., Лебедева Е. В. Условия формирования мотивации энергосбережения в системе профессионального образования / / Личность в профессионально-образовательном пространстве: материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции. – Екатеринбург, 2014. – С. 60–65.
7. Андреенкова А. В. Сравнительные межстрановые исследования в социальных науках: теория, методология, практика. – М.: Новый Хронограф, 2014. – 516 с.
8. Stern P. C. Toward a coherent theory of environmentally significant behavior. Journal of Social Issues, 2000, vol. 56, № 3, pp. 407–424 [Электронный ресурс]. Код доступа: http://web.stanford.edu/~kcarmel/CC_BehavChange_Course/readings/Stern_metareview_2000.pdf. https://doi.org/10.1111/0022-4537.00175.
9. Энергосбережение: за и против / / Официальный информационный ресурс ВЦИОМ. – 2010. – № 1405.
10. Насонова А. Е. Бережливое поведение и пропаганда энергосбережения / / Энергосбережение. – 2012. – № 1. – С. 35–37.

Energy-saving behavior actions in the Russian and European population

V. A. Prokhoda,
Moscow State University, Russia, senior researcher at the Philosophy of Education Department;
Financial University under the Government of the Russian Federation, associate professor at the Sociology, History, and Philosophy Department, PhD

Behavior based energy efficiency involves energy savings resulting from changes in individual behavior and decision-making. This paper summarizes the results of recent research assessing European residential behavior based energy efficiency and daily energy saving activities. It builds on the European Social Survey that was conducted among the population of 15 years old and up having different education and income. European countries have been ranked by energy-saving behavior actions in the population, by the energy consumption culture level, etc. The Russian population demonstrates the lowest energy consumption culture. The gathered social and demographic information was able to reveal some factors affecting energy-saving habits.

Keywords: *energy resources, energy efficiency, energy-saving behavior, energy consumption culture.*

УДК 621.039:62-622 DOI 10.18635/2071-2219-2018-3-36-39

Оценка надежности дизель-генераторов и резервирующих каналов АЭС

Р. З. Аминов,
Саратовский научный центр Российской академии наук,
главный научный сотрудник, доктор технических наук, профессор

Д. Ю. Кузнецов,
Балаковская АЭС, начальник отдела инженерной и технической поддержки эксплуатации

Разработаны концептуальные основы оценки надежности дизель-генераторных установок электроснабжения собственных нужд АЭС в аварийных ситуациях с обесточиванием. Рассмотрены основные факторы, которые могут оказать влияние на надежность работы резервных дизель-генераторов атомных электростанций на протяжении периодов их жизненного цикла, таких как состояние ожидания, запуск и работа под нагрузкой. Выполнены расчеты по оценке прогнозной вероятности отказа дизель-генератора и канала безопасности с исполнительными механизмами.

Ключевые слова: *надежность, безопасность, АЭС, резервирование, дизель-генератор, канал безопасности.*

Потенциальные аварийные ситуации с обесточиванием собственных нужд АЭС требуют обязательного наличия резервных источников электроэнергии, которые должны обеспечивать аварийное электроснабжение и исключать возможность расплавления и разрушения активной зоны и ядерного топлива, хранящегося в бассейнах выдержки. Некоторые ответственные потребители собственных нужд АЭС практически не допускают перерыва в электроснабжении. Этим требованиям в большей степени удовлетворяют дизель-генераторы, причем повышение надежности аварийного электроснабжения осуществляется экстенсивным путем с помощью увеличения числа резервных дизель-генераторов. Поэтому существует необходимость более глубокого изучения свойств надежности и безопасности таких систем в случае наступления предполагаемого события.

Надежность резервирующей электрогенерирующей системы в значительной степени определяется как техническим состоянием самих дизель-генераторов и режимов их загрузки, так и состоянием обслуживающих систем автоматики, пусковых устройств, топливо- и маслоснабжения, оборудования собственных нужд, то есть надежностью входящих в ее состав элементов, устойчивостью связей с обслуживающими подсистемами, допустимостью режимов загрузки и нагружения. На работоспособность и надежность самих резервирующих энергоустановок также оказывает влияние большое число факторов, включая качество технического обслуживания и ремонтно-восстановительных работ, используемые виды топлива и масел, периодичность проверок и опробований (длительности простоев) и т. д. С целью проведения более детального анализа надежности резервирования собственных нужд АЭС рассмотрим характерные особенности жизненного цикла резервных дизель-генераторов.

Основную часть времени дизель-генераторы находятся в состоянии ожидания (исключая простои в ремонтно-техническом обслуживании). Далее следуют пусковые режимы при проведении плановых проверок с заданной периодичностью и кратковременная работа в процессе проверок под нагрузкой и на холостом ходу. Принятое разбиение на периоды оправдано с точки зрения оценки вероятных показателей надежности на каждом из них, так как показатели могут иметь принципиальные отличия при последующей прогнозной оценке надежности в случае наступлении аварийной ситуации с обесточиванием с заданной ее продолжительностью.

Состояние ожидания

Все дизельные двигатели обладают достаточной надежностью, однако существует большое число факторов, в том числе внешних, которые могут оказать прямое влияние на надежность их работы. Для прогнозирования этих показателей и оценки связанных с ними рисков необходимо углубленное изучение протекающих сопутствующих процессов и самих отказов. В состоянии ожидания происходит накопление усталости агрегата (явление скрытого отказа) вследствие коррозионных процессов, а также старения целого ряда материалов (резины, пластмасс и т. д.). Однако скорость износа оборудования при этом значительно ниже, чем в процессе его работы на холостом ходу либо под нагрузкой. Накапливаемая усталость оборудования в процессе ожидания может стать причиной частичного или полного отказа его в процессе последующего выполнения основных функций [1], когда скрытый отказ становится явным. Скрытые дефекты выявляются в процессах периодических включений в работу оборудования.

По регламентируемым нормам, в частности, РД ЭО 0052-00, интенсивность отказа λ канала без-

опасности вместе с дизель-генератором в режиме ожидания не должна быть более $2{,}2 \cdot 10^{-5}$ 1/час, в то время как в режиме работы на мощности она увеличена до $5 \cdot 10^{-4}$ 1/ч, что соответствует наработке на отказ $T_{нар} = 1/\lambda = 2000$ ч. С целью обеспечения низкой интенсивности накопления отказов в период ожидания ежемесячно осуществляется проверочная работа каждого дизель-генератора продолжительностью не менее 30 минут под 50 % нагрузкой и около 5 минут на холостом ходу, но не более 30 минут.

Пусковые режимы

Это наиболее ответственный этап в работе дизель-генераторов как в процессе периодических опробований, так и при выполнении их основного функционального предназначения. Запуск резервных дизель-генераторов протекает в достаточно напряженных условиях, регламентируемое время пуска с выходом на режим холостого хода не должно превышать 15 секунд с последующим ступенчатым подключением асинхронных короткозамкнутых электродвигателей исполнительных механизмов канала. Общее время принятия нагрузки резервным каналом безопасности составляет 20–45 секунд. Необходимо отметить, что кратность пускового тока короткозамкнутого асинхронного двигателя может достигать 7 и его включение сопровождается ударной нагрузкой на дизель-генератор, сопровождающейся кратковременным повышением тока в цепи до 100–200 % от номинального. Быстрота запуска дизель-генератора отрицательно сказывается на его надежности вследствие значительных температурных и механических напряжений [2]. К тому же отмечается целый ряд сопутствующих факторов, которые могут оказать влияние на надежность запуска [3]. Номинальный расход масла устанавливается с некоторой задержкой по сравнению с частотой вращения, инерционность системы наддува не позволяет обеспечить требуемый расход воздуха и полноту сгорания топлива, низкая температура поверхностей цилиндров и поршней способствует конденсации из продуктов сгорания химически активных компонентов, активизирующих коррозионные процессы. По данным [3], из 100 последовательных команд на запуск допустимым количеством отказов является не более 1. Имеющаяся статистика отказов при запуске дизель-генераторов российских АЭС свидетельствует о непрерывном их снижении. Здесь очень важно приблизить условия пробных проверочных запусков к реальным условиям работы при наступлении аварийной ситуации с обесточиванием, что, как правило, трудновыполнимо.

Работа в аварийной ситуации с обесточиванием

При наступлении события и длительной работе дизель-генераторов в аварийной ситуации (по новым требованиям МАГАТЭ – 72 часа) могут возникнуть внезапные отказы как по общим причинам, так и вызванные спецификой использования резервного оборудования. К числу основных специфических факторов можно отнести качество дизельного топлива, обусловленное условиями его хранения.

По статистике, примерно половина всех неисправностей и отказов дизелей вызваны качеством топлива. При длительном хранении дизельного топлива на снижение его качества могут повлиять:

– контакт с медью или цинком;

– ускоряющийся распад дизельного топлива и его расслоение на фракции с ростом температуры в летний период. В нижней части баков скапливается более тяжелая темная фракция, которая может привести к отказу дизелей;

– наличие влаги в дизельном топливе, приводящее к активному росту бактерий и грибков, которые оседают в емкости и могут забить топливные фильтры;

– наличие присадок в топливе, которые быстро разлагаются и снижают качество дизельного топлива.

При соблюдении всех правил хранения дизельное топливо может сохранять свои эксплуатационные свойства только в течение одного года. Поэтому нормативный срок его хранения составляет один год, продлить его можно при проведении очистки топлива в фильтрах рециркуляции и систематической очистки емкостей хранения от накапливаемых отложений.

Отказы по общим причинам могут носить весьма разнообразный характер и быть обусловлены недоработками при конструировании, изготовлении, сборке и обкатке, качеством технического обслуживания и проверочных испытаний, человеческим фактором и др. Выполнение комплексной оценки показателей надежности таких систем – достаточно сложная задача, требующая привлечения накопленного многолетнего опыта эксплуатации. Поскольку для атомной энергетики статистика показателей длительности эксплуатации дизель-генераторов еще не накоплена, то можно воспользоваться ей из других областей использования, например, судовых дизель-генераторов [4, 5]. Статистика отказов цилиндропоршневых дизелей, включая топливные насосы высокого давления, на основе опыта эксплуатации большого числа установок приведена в [4]. Используя эти данные, можно получить усредненные значения наработки на отказ $T_{нар}$ и интенсивности отказов $\lambda = 1/T_{нар}$ в диапазоне продолжительности их работы до 24 тысяч часов. В диапазоне до 5 тысяч часов работы явно просматривается период приработки с повышенной интенсивностью отказов и самой низкой наработкой на отказ, усредненное значение которого составило $T_{нар}^{пр} = 465$ ч. В период стационарной работы (за пределами периода приработки) наработка на отказ колеблется в пределах $T_{нар}^{ст} \cong 700 \div 800$ ч.

С целью получения вероятностной оценки показателей надежности такой резервирующей системы вероятность ее отказа P можно представить в виде:

$$P = P_{зап} + P(t), \qquad (1)$$

где $P_{зап}$ – вероятность отказа при запуске дизель-генератора;

$P(t)$ – вероятность отказа в процессе работы с продолжительностью t.

Используя простейший поток событий с независимыми отказами [6], вероятность отказа $P(t)$ представим в виде:

$$P(t)=1-e^{-\lambda t}. \qquad (2)$$

С использованием зависимостей (1) и (2) определена прогнозная вероятность отказа дизель-генератора и канала в целом с учетом надежности работы насосов аварийной подачи питательной воды, аварийного ввода борной кислоты, аварийного расхолаживания первого контура и насосов спринклерной системы. Вероятность отказа насосов принималась по данным [5] для условий периода приработки насосов и стационарного периода. Средняя интенсивность отказов для одного насоса составила $\lambda^{пр} = 3{,}2\cdot10^{-5}$ 1/ч и $\lambda^{ст} = 1{,}7\cdot10^{-5}$ 1/ч. Поскольку эти значения на два порядка ниже интенсивности отказов самих дизелей, то в расчетах принято среднее ее значение за весь период эксплуатации насоса. Значение $P_{зап}$ принято на уровне 0,01.

Результаты расчетов представлены на рис. 1 и 2, а также в табл. 1. По полученным результатам можно видеть, что в вопросах оценки безопасности резервирования собственных нужд АЭС доминирующее влияние оказывает надежность дизель-генераторов. Учет надежности исполнительных систем канала не приводит к значительным корректировкам результатов. Надежность электроснабжения собственных нужд АЭС существенно зависит от продолжительности работы дизель-генераторов в аварийных режимах, ухудшаясь с ее увеличением.

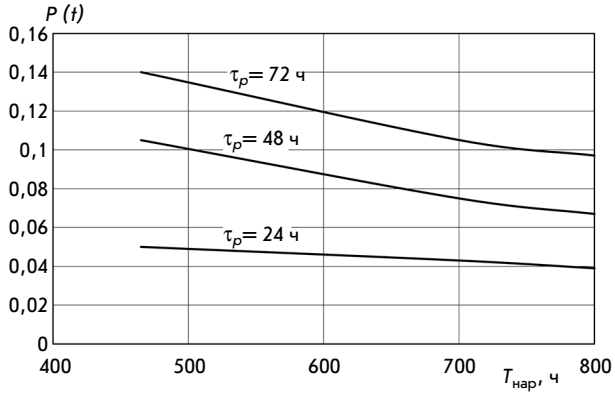


Рис. 1. Вероятность отказа дизель-генератора

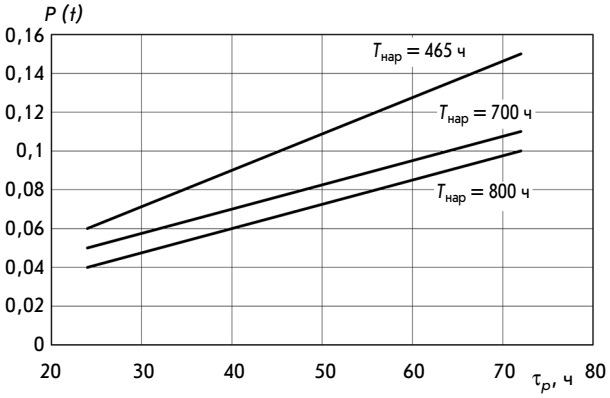


Рис. 2. Вероятность отказа канала (дизель-генератора с насосами аварийного расхолаживания)

Таким образом, доминирующее влияние на надежность работы канала безопасности АЭС оказывают дизель-генераторы; учет надежности исполнительных систем не приводит к значительным изменениям результатов расчетов. Продолжительность непрерывной работы дизель-генераторов существенно влияет на показатели их надежности, при этом вероятность отказа увеличивается в 2–2,5 раза с увеличением продолжительности работы от 24 до 72 часов. Это приводит к необходимости поиска новых путей эффективного сочетания хорошо освоенных пассивных систем резервирования собственных нужд АЭС на основе дизель-генераторов с активными источниками энергии, постоянно находящимися в работе и обладающими значительно лучшими показателями надежности длительного функционирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-08-00111 А.

Таблица 1

Вероятностные значения отказов дизель-генератора и канала безопасности в целом

Продолжительность работы, ч	Дизель-генератор			Канал		
	$T^{пр}_{нар}$ = 465 ч	$T^{ст}_{нар}$ = 700 ч	$T^{ст}_{нар}$ = 800 ч	$T^{пр}_{нар}$ = 465 ч	$T^{ст}_{нар}$ = 700 ч	$T^{ст}_{нар}$ = 800 ч
24	0,05	0,045	0,039	0,06	0,05	0,04
48	0,105	0,075	0,067	0,11	0,08	0,07
72	0,14	0,098	0,097	0,15	0,11	0,10

Литература

1. Острейковский В. А., Швыряев Ю. В. Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ. – М.: Физматлит, 2008. – 352 с.

2. Токмачев Г. В. Требования к системам аварийного электроснабжения АЭС на базе дизель-генераторов / / Энергетическое строительство. – 1990. – № 3. – С. 67–69.

3. Šaban J., Zaharija-Tiska D., Sirbunceij Z. Large diesel generators for nuclear power stations and processing industry, Končar Journal, 1988, iss. 1, pp. 41–47.

4. Башуров Б. П., Середа М. П., Чебанов В. С. Математические модели прогнозирования функциональной надежности элементов судовых дизелей при эксплуатации / / Двигателестроение. – 2011. – № 2. – С. 42–44.

5. Башуров Б. П., Баляев Д. В., Балякин А. В. Сравнительная оценка функциональной надежности элементов некоторых систем дизелей на основе обобщенного показателя / / Известия вузов. Машиностроение. – 2001. – № 4. – С. 26–32.

6. Гладышев Г. П., Аминов Р. З., Гуревич В. З. и др. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС. – М.: Высшая школа, 1991. – 304 с.

Reliability of auxiliary diesel generators and safety channels at nuclear power plants

R. Z. Aminov,
Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,
senior researcher, Doctor of Science, professor

D. Yu. Kuznetsov,
Balakovo Nuclear Power Plant,
head of the Engineering and Technical Support Department

Diesel generators as standby power supplies for nuclear power plants shall comply with strict requirements to ensure extremely high reliability. We have developed some fundamentals of reliability evaluation applying to NPP auxiliary power supply systems. During the life cycle, a diesel generator comes through a number of stages, including a standby mode, quick start, and operation under load, so reliability indicators may vary on every stage. In our paper, we discuss predominant reliability indicators and predictive failure probability assessment for auxiliary diesel generators and NPP safety channels.

Keywords: *reliability, safety, nuclear power plant, standby power supply, diesel generator, safety channel.*

УДК 658.264 DOI 10.18635/2071-2219-2018-3-40-42

Прогнозирование и диагностика колебаний дымовых труб, эксплуатируемых в энергетической отрасли

С. Б. Вердиев,
Азербайджанский университет архитектуры и строительства, г. Баку

Цилиндрические высотные конструкции, включая башни, дымовые трубы и другие сооружения, подвергаются значительной ветровой нагрузке. При совпадении их собственной частоты колебаний с частотой воздействия внешних воздушных потоков могут возникнуть опасные колебания всей структуры. В статье рассматриваются вопросы диагностики и прогнозирования колебательных показателей дымовых труб энергообъектов. Первая из поставленных задач заключается в изучении возможности прогноза импульсных отклонений цилиндрических высотных конструкций под воздействием ветра при наличии данных о гармонических отклонениях структуры по результатам измерений декремента колебаний в условиях зашумленности сигналов. Вторая задача связана с оптимизацией диагностики колебательных характеристик дымовых труб.

Ключевые слова: *дымовая труба, энергообъект, декремент колебаний, прогнозная оценка, измерения.*

Дымовые трубы различных конструкций находят применение на энергетических и промышленных объектах, в котельных и т. д. Деформации и повреждения дымовых труб могут возникать в результате бурь, землетрясений, при различных нарушениях технологического цикла отвода газов и по другим причинам [1]. Железобетонные трубы могут иметь высоту до 450 м, стальные – 200 м [1], причем вторые более подвержены влиянию динамических воздействий разного рода. Влиянию сильных ветров на состояние труб посвящено значительное количество работ [1–8].

Обычно различают продольное и поперечное воздействие ветра на цилиндрические высотные конструкции. Поперечное воздействие может вызвать вибрации в направлении, перпендикулярном направлению ветра, из-за проявления так называемого вихревого воздействия Бенара – Кармана [5].

Цилиндрические высотные конструкции имеют собственную частоту колебаний, и при совпадении этой частоты с частотой воздействия вихревых потоков могут возникнуть опасные колебания всей структуры [1, 5]. Согласно [6], могут быть рассмотрены следующие виды внешнего воздействия:

– внешнее воздействие гармонического характера;
– внешнее воздействие импульсного характера.

В настоящей статье ставятся задачи исследования возможности прогнозирования параметров импульсных отклонений цилиндрических структур по данным гармонических колебаний и оптимизации диагностики колебательных характеристик дымовых труб, эксплуатируемых в энергетической отрасли.

Прогнозирование параметров импульсных отклонений высотных дымовых труб по данным гармонических колебаний

Согласно [2, 6], в режиме гармонических колебаний отношение максимального отклонения a_1 конца цилиндрической трубы к ее диаметру d может быть определено как

$$\chi_1 = \frac{a_1}{d} = \frac{k \cdot C_1}{4\pi S_c \cdot S_t^2}, \quad (1)$$

где k – коэффициент, зависящий от формы вибраций;
C_1 – амплитуда внешнего гармонического воздействия;
S_c – число Скрутона;
S_t – число Струхаля.

Логарифмический декремент колебаний δ (рис. 1) определяется, согласно [6], как

$$\delta = \ln\frac{y_1}{y_2} = 2\pi\xi, \quad (2)$$

где y_1, y_2, – амплитуды колебаний (рис. 1);
ξ – критический показатель демпфирования.

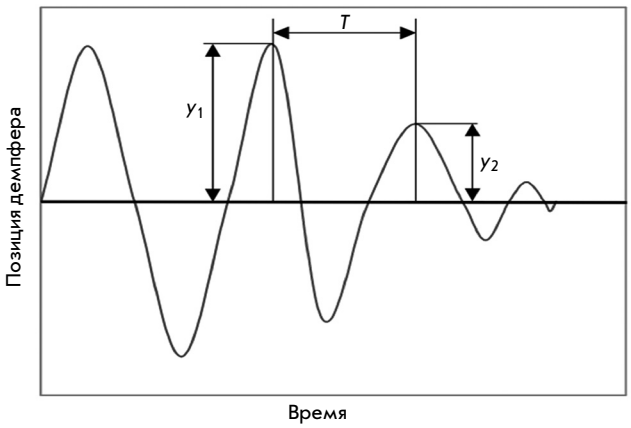


Рис. 1. Графическое пояснение определения логарифмического декремента колебаний δ (здесь T – период гармонических колебаний)

С учетом известного выражения для числа Скрутона и формулы (2) соотношение (1) выглядит следующим образом:

$$\chi_1 = \frac{k \cdot C_1 \cdot \rho \cdot d^2 \cdot 2\pi}{16\pi^2 \cdot m \cdot \delta \cdot S_t^2} = \frac{k \cdot C_1 \cdot (\rho \cdot d^2 / m)}{8\pi \cdot \delta \cdot S_t^2}, \quad (3)$$

где m – масса на единицу длины структуры;
ρ – плотность воздуха;
d – диаметр цилиндра.

Согласно [6], случайное вихревое воздействие на цилиндрические высотные структуры может быть охарактеризовано выражением:

$$\chi_2 = \frac{a_2}{d} = g \cdot \frac{[n \cdot S_{CL}(n)]^{\frac{1}{2}} (\rho \cdot d^2 / m)}{16\pi^{\frac{3}{2}} \cdot \xi^{\frac{1}{2}} \cdot S_t^2} \cdot f(\mu), \quad (4)$$

где a_2 – максимальное импульсное отклонение конца трубы;
$S_{CL}(n)$ – спектральная плотность колебаний перпендикулярно направлению ветра;
$f(\mu)$ – функция формы кривой;
g – пик-фактор, зависящий от резонансной частоты колебаний трубы и равный 3,5÷4;
n – частота колебаний трубы.

С учетом выражений (4) и (2) имеем:

$$\chi_2 = g \cdot \frac{[n \cdot S_{CL}(n)]^{\frac{1}{2}} (\rho \cdot d^2 / m) \cdot \sqrt{2\pi}}{16\pi^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{\delta} \cdot S_t^2}. \quad (5)$$

Исследуя достоверность прогнозирования величины a_2 с учетом зашумленности измеряемых электрических сигналов, получим выражение:

$$a_2 = \frac{a_1 \cdot \ln\left(\frac{\psi_1}{\psi_2}\right)}{\Phi(k, C_1, g)}, \quad (6)$$

где ψ_1 – отношение «сигнал/шум» при измерении y_1;
ψ_2 – отношение «сигнал/шум» при измерении y_2; под шумом понимаются случайные электрические сигналы, возникающие в канале измерения;
$\Phi(k, C_1, g)$ определяется как

$$\Phi(k, C_1, g) = \frac{2k \cdot C_1 \cdot \pi^{3/2}}{\pi \cdot g \cdot [n \cdot S_{CL}(n)]^{\frac{1}{2}} \sqrt{2\pi}}. \quad (7)$$

Полученное выражение (6) позволяет формировать прогнозные оценки a_2 при известной величине a_1 и вычисленных величинах ψ_1 и ψ_2. Как видно из (6), при относительно малых значениях ψ_2, то есть при быстром угасании колебаний, получаем более высокие прогнозные значения a_2, и наоборот. Физически такое явление вполне понятно, так как в этом случае вся накопленная энергия затрачивается на предшествующий толчок структуры. Однако для достижения достоверности таких прогнозных оценок должна быть обеспечена низкая зашумленность результатов измерений.

Оптимизация диагностики деформационных характеристик дымовых труб энергообъектов

Для изучения вопроса оптимизации диагностики деформационных характеристик дымовых труб энергообъектов предлагается зонально-территориальный метод оптимального планирования.

Допустим, что на исследуемой территории дымовые трубы установлены с неравномерной пространственной плотностью и территория может быть разделена на зоны, где количество дымовых труб по различным зонам составляет упорядоченное множество. Графическое отображение рассматриваемой ситуации показано на рис. 2.

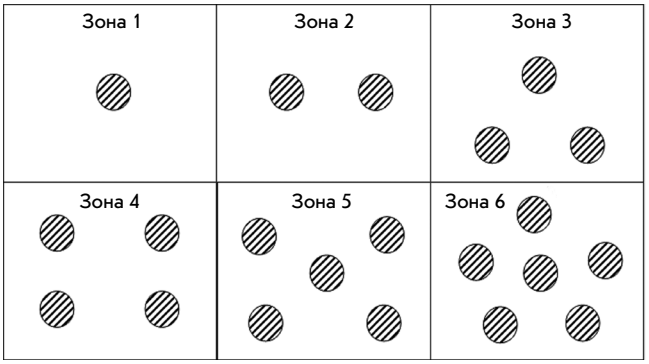


Рис. 2. Графическая интерпретация зональной структуры расположения труб на территории

Смысл проводимой оптимизации заключается в следующем. В каждой из зон производится измерение показателей y_1 и y_2 для всех труб. С целью уменьшения влияния шумов на результаты измерений проводятся повторные измерения: y_1 измеряется n_1 раз, y_2 – n_2 раз. Согласно теории случайных погрешностей, в этом случае шумы уменьшаются в $\sqrt{n_1}$ раз и $\sqrt{n_2}$ раз соответственно.

Условно переходя на непрерывную форму записи и введя функцию связи $n_1 = \varphi(n_2)$, количество информации, полученной при проведении измерений показателя δ для труб всех зон, оценим как

$$M_{01} = \int_1^{n_{\max}} kn_2 \cdot \ln\left[\frac{\psi_{01} \cdot \sqrt{\varphi(n_2)}}{\psi_{02} \cdot \sqrt{n_2}}\right] dn_2. \quad (8)$$

Введя следующее ограничение на функцию $\varphi(n_2)$:

$$\int_1^{n_{\max}} \varphi(n_2) dn_2 = C_1 = \text{const}, \quad (9)$$

можно сформировать целевой функционал безусловной вариационной оптимизации, являющейся математическим выражением оптимизационной задачи нахождения функции $\varphi(n_2)$. Решение указанной задачи с применением метода Эйлера [8] показало, что целевой функционал достигает максимума при условии:

$$n_1 = f(n_2) = k \cdot C_1 \cdot n_2. \quad (10)$$

Суммарная информативность всех проводимых измерений окажется максимальной при выполнении условия (10). При этом информативность результатов проводимых измерений отклонений труб под воздействием ветра понимается как потенциальная возможность получения четко различимых данных о состоянии трубы. Что касается технических средств, пригодных для измерения отклонений труб, то с этой целью могут быть использованы GPS-измерители, тотальные станции и лазерные сканеры [3, 9, 10].

Решение задачи прогноза импульсных отклонений цилиндрических высотных конструкций под воздействием ветра при наличии данных о гармонических отклонениях структуры по результатам измерений декремента колебаний в условиях зашумленности сигналов показало, что прогнозные величины амплитуды отклонения трубы в импульсном режиме прямо пропорциональны логарифму отношения показателей «сигнал/шум» результатов измерений последовательных отклонений трубы в режиме затухающих колебаний. Для прогнозной оценки максимального отклонения конца трубы при импульсном внешнем воздействии достаточно провести измерение y_1 и y_2, вычислить соответствующие отношения «сигнал/шум», а также определить значение функции $\Phi(k, C_1, g)$ и величину искомого импульсного отклонения конца трубы по (6). Следовательно, в данном случае отпадает необходимость физического моделирования импульсного воздействия на трубу, что может обеспечить существенную экономию средств, затрачиваемых на диагностику трубы.

Решение задачи оптимизации диагностики деформационных характеристик дымовых труб энергообъектов, подвергаемых воздействию ветра, показало, что для достижения высокой информативности результатов измерений декремента затуханий кратность измерений большой и малой амплитуд должна быть в прямо пропорциональной зависимости. Для высокой достоверности результатов измерения декремента собственных колебаний трубы следует проводить серийные многократные измерения величин y_1 и y_2. При этом высокая достоверность результата измерений может быть достигнута в том случае, если при переходе от серии к серии будет соблюдено соотношение (10) между числами соответствующих измерений n_1 и n_2. Повышение достоверности измерения декремента колебаний трубы способствует более высокой точности результатов диагностических работ.

Литература

1. Стриха И. И., Карницкий Н. Б. Экологические аспекты энергетики. – Минск: Технопринт, 2001.
2. Kuras P., Ortyl L., Kedzierski M., Podstolak P. Vibration measurements of steel chimneys equipped with mass dampers, using interferometric radar, robotic total station and accelerometer. PAK, 2014, vol. 60, no. 12, pp. 1090–1095.
3. Porter M. A., Martens D. H., Blevins R. D. Measurement and analysis of the wind induced vibration of a tall stack [Электронный ресурс]. Код доступа: www.researchgate.net/publication/296328151_Measurement_and_analysis_of_the_wind_induced_vibration_of_a_tall_stack.
4. Çelebi M., Prescott W., Stein R., Hudnut K., Behz J., Wilson S. GPS monitoring of structures: Recent advances [Электронный ресурс]. Код доступа: www.eew.caltech.edu/docs/Celebi_etal_Spectra.pdf.
5. Kuras P. Surveying techniques in vibration measurement. MATEC Web of Conferences, 2015, vol. 24. https://doi.org/10.1051/MATECCONF/20152402004.
6. Holmes J. D. Response of cylindrical structures to vortex shedding in the natural wind. Proceedings of 13th Australian Fluid Mechanics Conference, Monash University, Melbourne, Australia, 1998, pp. 401–403.
7. Reid S. Wind action and responses of steel chimneys [Электронный ресурс]. Код доступа: https://pdfs.semanticscholar.org/b61d/3d469b20c39c37b8587c43dba0337f719132.pdf.
8. Эльсгольц Л. П. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. – М.: Наука, 1974. – 432 с.
9. Tretyak K., Savchyn I. Posteriori optimization of active geodetic monitoring networks. Reports on Geodesy and Geoinformatics, 2014, vol. 96, pp. 67–77.
10. Брынь М. Я. О точности определения планового положения межевых знаков участков урбанизированных земель / / Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2007. – № 69. – С. 164–167.

Vibration prognostics and optimal diagnostics of chimneys at power generation facilities

S. B. Verdiyev,
Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan

Chimneys, towers, and other stack structures are highly sensitive to the dynamic effect of wind. Frequency of tall structure vibration may go into resonance leading to severe deflection and structure damage. In this paper, the author discusses two important objectives of prognostics and optimal diagnostics of vibration of chimneys at power generation facilities. The first one is related to research of possibility of impulse deflection projections by using information and test results on harmonic deflection and logarithmic decrement obtained under signal disturbance conditions. The second goal is to consider ways of optimal diagnostics of chimney vibration.

Keywords: *chimney, power generation facility, logarithmic decrement, prognostic analysis, measurement.*

УДК 621.792:66.084.8 DOI 10.18635/2071-2219-2018-3-43-46

Исследование влияния интенсивности ультразвуковых колебаний на нагрев и склеивание деталей из электроизоляционного картона

С. Г. Адиков,
ООО «Дельта Трафо»,
главный инженер проекта,
кандидат технических наук, доцент

О. В. Кретинин,
Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,
доктор технических наук, профессор

А. Е. Шевелев,
ООО «ВЗОР», инженер

Качество склеивания электроизоляционных деталей оказывает непосредственное влияние на их изоляционные свойства. Представленная работа является продолжением экспериментальных исследований ультразвукового способа изготовления клееных электроизоляционных деталей, который позволяет устранить недостатки традиционного способа. Исследуется влияние интенсивности ультразвуковых колебаний на нагрев и склеивание деталей из электроизоляционного картона. Показано, что снижение интенсивности ультразвуковых колебаний приводит к уменьшению скорости нагрева. Равномерность нагрева может быть обеспечена за счет увеличения удельного давления прижатия деталей из электроизоляционного картона к ультразвуковому излучателю.

Ключевые слова: *электроизоляционный картон, ультразвук, нагрев, склеивание, интенсивность.*

В качестве основной твердой изоляции масляных трансформаторов в настоящее время применяют электроизоляционный картон и бумагу. Электроизоляционный картон обычно изготавливается и поставляется в листах толщиной не более 3 мм. Однако детали изоляции трансформаторов обычно имеют существенно большую толщину и потому изготавливаются наборными с помощью склеивания и последующей механической обработки. Склеивание электроизоляционных деталей осуществляется в специальных гидравлических прессах с подогревом прессующих плит [1]. Такой способ имеет существенные недостатки, связанные со значительным расходом электроэнергии на процесс склеивания, низкой производительностью этого процесса, нерациональным использованием оборудования при выпуске малых партий деталей, неравномерностью давления прессовки вследствие колебаний толщины и разности усадки картона, что оказывает влияние на изоляционные свойства деталей и снижает надежность изоляции. Представляется целесообразной разработка альтернативных способов изготовления клееных электроизоляционных деталей, позволяющих устранить вышеуказанные недостатки. Одним из таких способов является ультразвуковое склеивание.

Под ультразвуковым склеиванием электроизоляционных материалов понимается процесс соединения, при котором на клеевую прослойку в процессе ее формирования оказывают воздействие ультразвуковыми колебаниями, направленными перпендикулярно склеиваемым поверхностям, при непосредственном механическом контакте склеиваемой детали или пакета заготовок с излучающей поверхностью ультразвукового излучателя. Процессы, происходящие при таком воздействии, рассматривались в [2–4]. Предлагаемая работа оценивает влияние интенсивности ультразвуковых колебаний на процесс нагрева и склеивания деталей из электроизоляционного картона и является продолжением этих исследований. Конечная цель разработки – определение основных параметров, влияющих на ультразвуковой нагрев, склеивание, и степени их влияния. Планируется применять полученные результаты в технологических процессах, связанных со склеиванием электроизоляционных деталей.

Подробное описание экспериментальной установки и методика экспериментов приведены в [2]. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1.

Эксперименты проводились с использованием двух магнитострикционных излучателей (преобразователей магнитострикционных): стандартного ПМС-15А-18 и самостоятельно разработанного и изготовленного, условно обозначенного ПМС-5-18, с излучающей поверхностью в виде круглой пластины диаметром 170 мм и толщиной в 4 мм (рис. 2). Оба излучателя имели рабочую (резонансную) частоту 18 кГц и потребляемую мощность 4,5 кВт. Амплитуда колебаний на торце ультразвукового излучателя

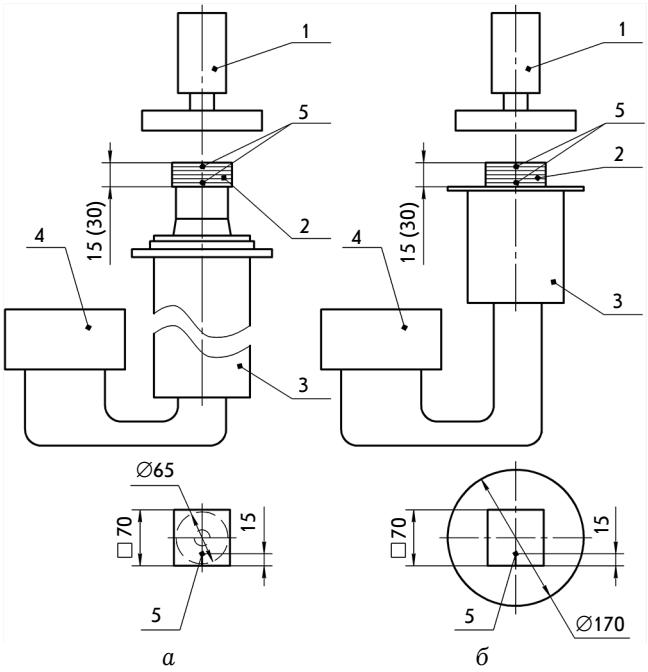


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с ультразвуковым излучателем ПМС-15А-18 (а) и ультразвуковым излучателем ПМС-5-18 (б):

1 — гидроцилиндр с прижимом;
2 — пакет заготовок электроизоляционного картона;
3 — ультразвуковой излучатель;
4 — ультразвуковой генератор;
5 — термопары

ПМС-15А-18 составляла порядка 12 мкм, а на торце излучателя ПМС-5-18 (в центральной части круглой пластины) – порядка 5 мкм. Соответственно, интенсивность ультразвуковых колебаний, вводимых в пакеты заготовок вторым излучателем, была меньше примерно в 6 раз. Необходимо отметить, что, несмотря на сравнительно большой размер излучающей поверхности излучателя ПМС-5-18, основные колебания на ней наблюдались в зоне пайки магнитострикционного преобразователя (участок 60×60 мм в середине пластины).

Рис. 2. Ультразвуковой излучатель типа ПМС-5-18 с излучающей поверхностью в виде круглой пластины

Ультразвуковому воздействию подвергались шестислойные (общая толщина 15 мм) и двенадцатислойные (общая толщина 30 мм) пакеты заготовок из электроизоляционного картона марки Б по ГОСТ 4194-88; размеры каждой склеиваемой пластины 70×70×2,5 мм. Предварительно на одну из сторон каждой пластины электрокартона был нанесен слой бакелитового лака марки ЛБС-1, после чего они были высушены.

С помощью термопар типа К диаметром 0,5 мм и показателем тепловой инерции менее 0,1 с определялась зависимость нагрева пакетов заготовок из электроизоляционного картона разной толщины от времени при различных величинах удельного давления их прижатия к ультразвуковому излучателю. В шестислойные пакеты образцов закладывалась одна термопара в середину пакета, в двенадцатислойные – по две термопары между вторым и третьим и между десятым и одиннадцатым слоями, считая снизу. Глубина заложения термопар составляла 15 мм.

Результаты экспериментов показаны на рис. 3–5. Все кривые приведены к одной общей точке начала ультразвукового воздействия.

Во всех экспериментах рост температуры начинался одновременно с началом ультразвукового воздействия. При этом скорость роста температуры была гораздо выше, чем при обычном нагреве. Это свидетельствует о наличии источников тепла

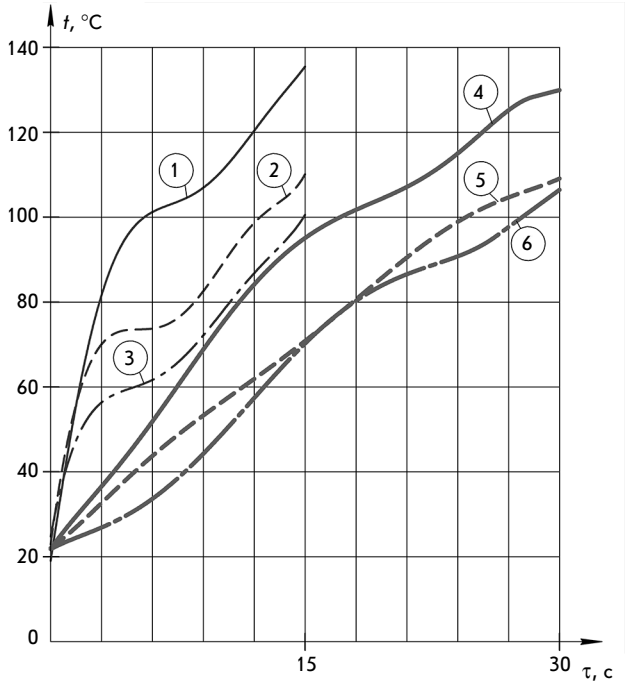


Рис. 3. Зависимости температуры от времени при ультразвуковом воздействии на шестислойные образцы при различном удельном давлении:

1 — 0,76 МПа (ПМС-15А-18);
2 — 1,27 МПа (ПМС-15А-18);
3 — 2,54 МПа (ПМС-15А-18);
4 — 0,76 МПа (ПМС-5-18);
5 — 1,27 МПа (ПМС-5-18);
6 — 2,54 МПа (ПМС-5-18)

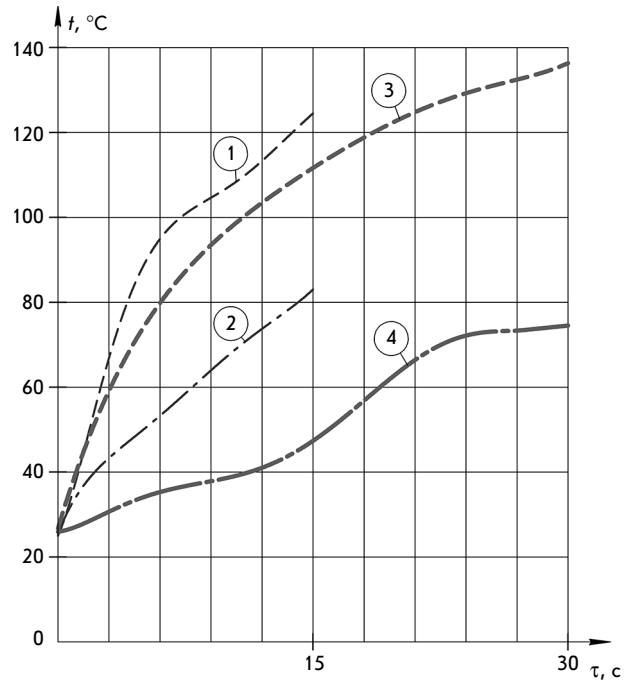


Рис. 4. Зависимости температуры от времени при ультразвуковом воздействии на двенадцатислойные образцы при различном удельном давлении (нижняя термопара):

1 – 1,27 МПа (ПМС-15А-18);
2 – 2,54 МПа (ПМС-15А-18);
3 – 1,27 МПа (ПМС-5-18);
4 – 2,54 МПа (ПМС-5-18)

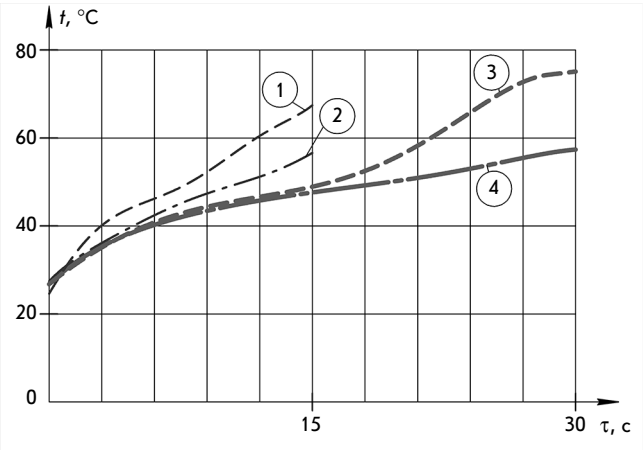


Рис. 5. Зависимости температуры от времени при ультразвуковом воздействии на двенадцатислойные образцы при различном удельном давлении (верхняя термопара):

1 – 1,27 МПа (ПМС-15А-18);
2 – 2,54 МПа (ПМС-15А-18);
3 – 1,27 МПа (ПМС-5-18);
4 – 2,54 МПа (ПМС-5-18)

непосредственно внутри пакетов заготовок электроизоляционного картона. Такой объемный нагрев обусловлен внутренним трением как в самом картоне, так и в неоднородностях клеевых соединений, а также отражениями ультразвуковой волны от границ раздела «электроизоляционный картон – клей – воздух».

В отличие от ультразвукового воздействия на древесину [3, 4], с увеличением удельного давления прижатия скорость роста температуры и максимальные значения температуры уменьшаются, что, по-видимому, свидетельствует о превалирующем влиянии на нагрев явлений на границе раздела, поскольку с увеличением давления прижатия пакет заготовок становится более однородным. В дальнейшем требуется провести эксперименты для определения зависимости нагрева пакетов заготовок от марки клея и толщины клеевого слоя.

С уменьшением интенсивности ультразвуковых колебаний в 6 раз пакеты заготовок электроизоляционного картона стали нагреваться примерно в 2 раза медленнее, поэтому длительность воздействия в этом случае была увеличена в 2 раза до 30 секунд (рис. 3–5). Однако все равно наблюдалась неравномерность нагрева пакета заготовок по высоте (для двенадцатислойных пакетов), которую удалось уменьшить только за счет увеличения удельного давления прижатия.

Шестислойные пакеты заготовок в целом удавалось склеивать с приемлемым качеством за 12–15 секунд при использовании ультразвукового излучателя ПМС-15А-18 и за 25–30 секунд при использовании ультразвукового излучателя ПМС-5-18. При этом удельное давление прижатия не играло решающей роли, поскольку пакеты заготовок прогревались достаточно равномерно во всех экспериментах. При склеивании таких сравнительно тонких пакетов самым важным будет определение требуемой длительности воздействия, поскольку перегрев приводит к обугливанию и возгоранию пластин электроизоляционного картона (рис. 6).

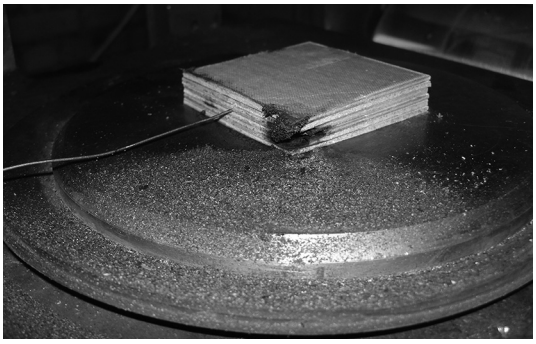


Рис. 6. Обугливание пластин шестислойного пакета заготовок при увеличении времени воздействия до 45 с (ультразвуковой излучатель ПМС-5-18, видна термопара, установленная в центр пакета, гидравлический прижим поднят)

Двенадцатислойные пакеты заготовок полностью склеивать не получалось. Даже при наибольшем удельном давлении прижатия удавалось склеивать не более 8–9 слоев электроизоляционного картона на любом из излучателей. В дальнейшем требуется провести эксперименты по ультразвуковому склеиванию таких пакетов с еще большими удельными давлениями прижатия до 10–15 МПа, а также эксперименты по двустороннему ультразвуковому воздействию на пакет заготовок.

Для определения зоны проклеивания пакетов заготовок были проведены эксперименты по

воздействию ультразвукового излучателя ПМС-5-18 с большой излучающей поверхностью на пакеты заготовок размером 70×140 мм. Время воздействия ограничивалось 7 секундами, чтобы процесс склеивания только начался. В данном случае склеивание осуществлялось только на участке, соответствующем размеру пакета преобразователя (рис. 7). Для склеивания деталей большого размера потребуется обеспечивать большую зону воздействия, чего можно достичь, например, использованием группы излучателей или путем взаимного перемещения ультразвукового излучателя и склеиваемой детали.

Таким образом, эксперименты показывают, что объемный нагрев пакетов заготовок из электрокартона при ультразвуковом воздействии обусловлен внутренним трением как в самом картоне, так и в неоднородностях клеевого соединения, а также отражениями ультразвуковой волны от границ раздела «электроизоляционный картон – клей – воздух». Снижение интенсивности ультразвуковых колебаний в 6 раз приводит к уменьшению скорости нагрева пакета заготовок в 2 раза. Тем не менее наблюдается существенная неравномерность нагрева пакета заготовок по высоте. Обеспечение равномерности нагрева возможно за счет увеличения удельного давления прижатия пакета заготовок к ультразвуковому излучателю, а также при осуществлении двустороннего воздействия. На имеющемся оборудовании удалось с приемлемым качеством обеспечить склеивание деталей толщиной не более 20 мм за 15–20 секунд.

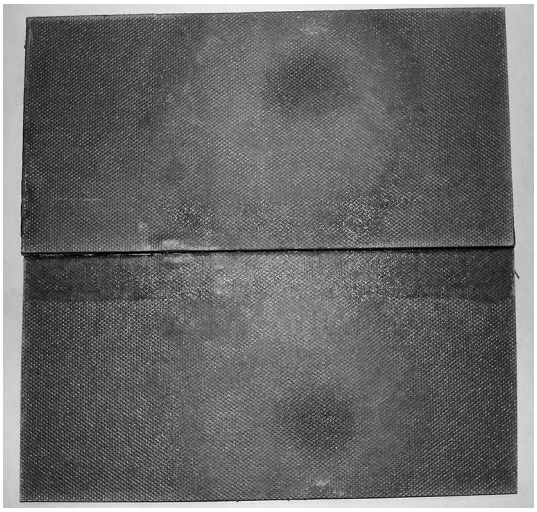


Рис. 7. Неполное проклеивание шестислойных пакетов заготовок больших размеров

Нагрев и склеивание деталей из электроизоляционного картона осуществляется только непосредственно в зоне ультразвукового воздействия, определяемой размерами излучающей поверхности излучателя. Для склеивания деталей больших габаритных размеров потребуется обеспечить взаимное перемещение ультразвукового излучателя и детали либо применять специальные ультразвуковые излучатели.

Литература

1. Герасимова Л. С., Дейнега И. А., Пшеничный Г. И., Чечелюк Я. З. Технология и механизация производства обмоток и изоляции силовых трансформаторов. – М.: Энергия, 1979. – 360 с.
2. Адиков С. Г., Боков А. В., Волков О. В. Экспериментальные исследования ультразвукового нагрева и склеивания деталей из электроизоляционного картона / / Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2012. – № 3. – С. 16–20.
3. Адиков С. Г., Кудрявцев С. А., Кретинин О. В., Знаменский А. И. Исследование нагрева заготовок из древесины при ультразвуковом воздействии высокой мощности / / Заготовительные производства в машиностроении. – 2011. – № 10. – С. 45–48.
4. Адиков С. Г., Кретинин О. В., Волков О. В., Шевелев А. Е. Влияние интенсивности ультразвуковых колебании на нагрев заготовок древесины при воздействии поперек волокон / / Заготовительные производства в машиностроении. – 2013. – № 5. – С. 43–46.

Research on variable intensity ultrasonic heating and bonding of paperboard electrical insulation parts

S. G. Adikov,
Delta Trafo LLC, Nizhny Novgorod, Russia, chief project engineer, PhD, assistant professor

O. V. Kretinin,
Nizhny Novgorod State Technical University, Russia, Doctor of Science, professor

A. E. Shevelev,
VZOR LLC, Nizhny Novgorod, Russia, engineer

Critical properties of paper and paperboard electrical insulation that determine its functional life are mechanical strength and dielectric strength. In a manufacturing process, heating and bonding of paperboard electrical insulation parts affect insulation properties. The author presents his experimental research on ultrasonic heating and bonding of insulating paperboard. The research addresses the question how ultrasonic intensity affects heating and bonding. Less-intensity ultrasound lowers the process. To avoid uneven heating, it is recommended to press the paperboard parts to the emitter with more pressure.

Keywords: *electrical insulating paperboard, ultrasonic heating, bonding, intensity.*