

УДК 664.951.65

В. Н. Карпов, И. А. Немцев

## Экспериментальное определение показателей энергетической эффективности и их использование для устойчивого развития потребительских систем

V. N. Karpov, I. A. Nemtsev

### Experimental determination of energy efficiency indices and their use for consumer systems' sustainable development

**Аннотация.** Изложены основные теоретические положения, разработанные коллективом научной школы "Эффективное использование энергии". Показаны варианты использования разработанного метода повышения энергоэффективности предприятий АПК, позволяющего обеспечить их устойчивое развитие.

**Abstract.** The main theoretical positions developed by the team of the scientific school "Energy Efficiency" have been considered. Some variants of using the developed method for improving energy efficiency of agricultural enterprises allowing ensure their sustainable development have been given.

**Ключевые слова:** энергетическая эффективность, потребительская энергетическая система, энерготехнологический процесс, энергетическая характеристика оборудования.

**Key words:** energy efficiency, consumer energy system, energy technological process, energy characteristics of equipment.

#### Введение

Один из наиболее актуальных на сегодняшний день вопросов связан с преодолением последствий экономического и экологического кризисов, имеющих серьезные негативные последствия на локальном и глобальном уровнях. На современном этапе технического и экономического развития общества хозяйственная деятельность человека приводит к обострению противоречий между функционированием технических, экономических и экологической систем.

Термин "устойчивое развитие" получил широкое распространение после того, как в 1987 г. Международная комиссия по окружающей среде и развитию, созданная Генеральной Ассамблеей ООН (Комиссия Г. Х. Брундтланд), в своем докладе "Наше общее будущее" [1] сформулировала следующее определение: "устойчивое развитие – это развитие, которое удовлетворяет потребностям настоящего времени, но не ставит под угрозу способность будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности".

Развитие отраслей сельского хозяйства является основой социально-экономической стабильности общества на сельских территориях, обеспечивающей продовольственную безопасность государства. В свою очередь развитие АПК базируется на энергетике, экономике и экологии. Надежность и энергоэффективность – это фундамент, обеспечивающий устойчивое развитие отдельного предприятия АПК и всей отрасли в целом.

Проведенный анализ литературных источников с целью определения требований к методическому обеспечению энергосбережения, оценки методов повышения эффективности и обоснования на их основе мер по совершенствованию практического энергосбережения на предприятиях АПК позволил выявить метод, отвечающий комплексной специфике рассматриваемой проблемы.

В качестве базового научного метода был выбран метод конечных отношений (МКО), разработанный научной школой "Эффективное использование энергии" ФГБОУ "Санкт-Петербургский государственный аграрный университет" (СПбГАУ) (рук. – д-р техн. наук проф. Карпов В. Н.), поскольку он является универсальным и позволяет реализовать комплексный подход к решению проблем энергетики предприятий АПК [2].

Целью данной работы является демонстрация вариантов использования выбранного метода повышения энергоэффективности предприятий АПК, позволяющего обеспечить их устойчивое развитие.

#### Материалы и методы

Необходимость постоянного повышения энергоэффективности производства – это новая научная задача, которая привела к выделению специального вида технических систем (в том числе агроинженерных) с непрерывным подводом энергии, т. е. действующих систем. Эта проблема обусловила переход в образовании от выбора оборудования и схемы его размещения к объединению технологического и энергетического оборудования в потребительскую энергетическую систему (ПЭС), включающую энерготехнологические процессы (ЭТП), обеспечивающие получение за счет действия энергии всех результатов, предусмотренных технологией производства. ПЭС является более информативной по сравнению со схемой размещения, так как она позволяет контролировать результат действия энергии в энергетическом и технологическом оборудовании.

Энерготехнологический процесс является конечным элементом в энергетической линии и предназначен для реализации цели потребления энергии – получения необходимого свойства, параметра состояния технологической среды. ЭТП по назначению подразделяются на три вида: производственные (ЭТП1), вспомогательные (ЭТП2) и обеспечивающие условия жизнедеятельности (ЭТП3). Охватывая все направления использования энергии у потребителя, именно ЭТП определяют расчетный объем потребляемой энергии. Также схема включает в себя элементы передачи энергии по линии ( $\eta$ ), которые влияют на показатели эффективности выбранного силового оборудования.

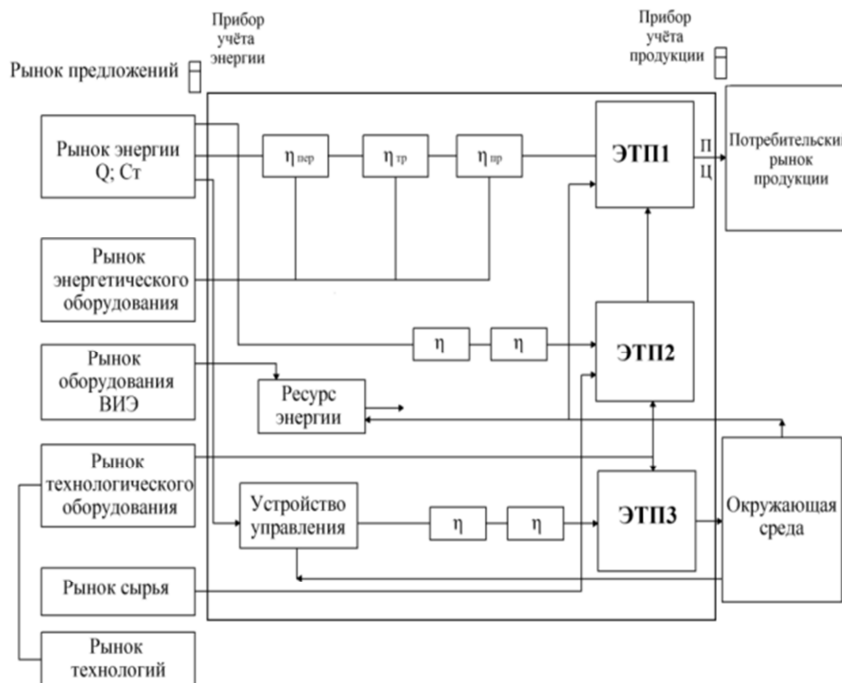


Рис. 1. Структурная схема ПЭС

ПЭС позволяет обеспечивать устойчивое развитие предприятия, так как дает возможность оценивать взаимодействие действующей технической системы (техника) с окружающей средой (экология) и рынком (экономика) на основе постоянного мониторинга показателей энергоэффективности. Условными границами ПЭС являются: на входе – место установки прибора учета потребляемой энергии, на выходе – место учета продукции для реализации на рынке и контроля результата во всех ЭТП. Такая установка границ ПЭС предопределяет, во-первых, возможность сопоставления затрат на энергию и получаемого дохода, во-вторых, необходимость рассмотрения приемников энергии как конечных элементов в энергетической линии с соответствующим энергетическим процессом.

ПЭС – комплексное представление, которое отражает основные аспекты, входящие в определение действующей технической системы и раскрывает содержание системности, доказывая тем самым, что энергетическая система предприятия не может рассматриваться как формальное объединение элементов. Становится очевидным, что только целенаправленное управление энергетическими процессами всей потребительской системы позволит уменьшать значение общего производственного критерия эффективности – энергоемкости продукции.

В качестве унифицированного метода определения параметров эффективности ПЭС коллективом научной школы "Эффективное использование энергии" СПбГАУ разработан и предложен метод конечных отношений (МКО), основанный на измерениях энергии в конечных точках элементов и позволяющий оценить эффективность процесса в любом элементе (рис. 2) по отношению к полученному результату в ЭТП, а не по отношению к техническим возможностям этого элемента.

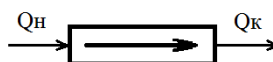


Рис. 2. Схема энергетического элемента ПЭС

Измерение и регистрация процесса движения энергии в двух конечных сечениях (т. е. в начале элемента  $Q_n(t)$  и в конце  $Q_k(t)$ ) позволяет получить тождественное выражение, связывающее три энергетических параметра, два из которых известны по результатам измерений (третий – потери). Таким образом, метод дает

готовое решение для всех сочетаний различных функций параметров. В монографии [2] введено понятие относительной энергоёмкости процесса:

$$Q_s = \frac{Q_n}{Q_k} \quad (1)$$

Определяемым параметром являются потери в элементе, которые снижают эффективность любого процесса. Это позволяет считать МКО прямым методом энергосбережения, который защищен патентом РФ<sup>1</sup>.

### Результаты и обсуждения

Метод конечных отношений позволяет реализовать диагностическую функцию контроля эффективности оборудования на всех стадиях жизненного цикла. Для этого на стадии реализации системы регистрируется зависимость энергоёмкости или относительных потерь от нагрузки (от  $P_k$ ) нового оборудования. Эта характеристика может быть сопоставлена с паспортными или табличными (заводскими) данными вида оборудования для заключения о его энергетическом качестве. При повторном энергетическом обследовании на стадии эксплуатации, через продолжительное время работы, отличие снятой энергетической характеристики от исходной (для нового) определит степень энергетического износа оборудования, необходимую для решения вопроса о целесообразности его дальнейшей эксплуатации.

Для иллюстрации высказанного предложения приведем данные экспериментального исследования по определению энергоёмкости отдельного ЭТП – нагрева воды в электроводонагревателе. Этот процесс является весьма распространенным в сельскохозяйственном производстве и при этом весьма показательным. В качестве объекта исследований был выбран накопительный водонагреватель типа ЭВБО-20/1,25. Основные параметры нагревателя: габаритные размеры – 360 x 300 x 270 мм; объем нагреваемой воды – 20 л; номинальная мощность ТЭН –  $P_n = 1,25$  кВт; номинальное напряжение питающей сети –  $U_{ном} = 220$  В<sup>2</sup>.

Общее число исходных для анализа параметров процесса согласно МКО три (потребленная энергия  $Q$ , результат процесса  $R$  и затраченное время  $t$ ), поэтому процесс удобно отображать в виде точек в плоской системе координат, образующих визуальное представление процесса, которое предлагается называть универсальной энергетической диаграммой (рис. 3) [3].

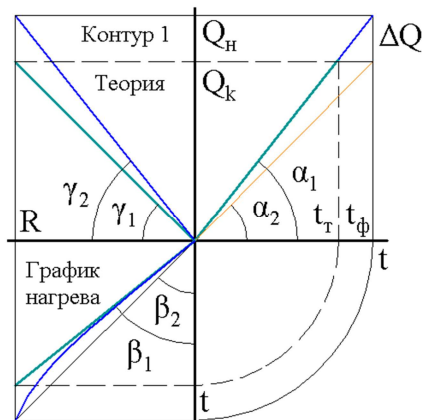


Рис. 3. Универсальная энергетическая диаграмма

Алгоритм анализа процесса при помощи диаграммы следующий:

1. Построение начинается с теоретического контура (обозначен пунктиром), на котором откладывается результат процесса и теоретическое количество энергии, необходимое для его достижения. Результатом рассматриваемого в примере процесса является изменение температуры воды ( $\Delta T$ ) от начального ( $T_n$ ) до конечного, заданного значения ( $T_k$ ).

В процессе нагрева потребляемая электрическая энергия ( $Q_n$ ) при помощи трубчатого электронагревателя (ТЭН) преобразуется в тепловую и накапливается в воде ( $Q_k$ ). Повышение температуры – интегральный результат  $R$  воздействия энергии на объем жидкости. Эффективность преобразования электрической энергии в тепло будем считать наивысшей, так как ТЭН имеет высокий КПД и находится непосредственно в воде.

Минимальное количество энергии, необходимое для достижения технологического результата, согласно терминологии МКО:

$$Q_k = Q^{yd} \cdot R, \quad (2)$$

<sup>1</sup> Способ контроля и управления энергопотреблением. Пат. на изобретение RUS № 2212746. 29.06.2001.

<sup>2</sup> Характеристики водонагревателя ЭВБО-20/1 Элвин [Электронный ресурс]. URL: <http://www.teplosezon.ru/shop/56/570>.

где  $Q^{уд}$  – теоретически обоснованная удельная энергоёмкость, определяемая в общем случае физическими константами, нормативными или экспериментальными данными.



Рис. 4. Общий вид ИИС

Для рассматриваемого процесса нагрева удельная энергоёмкость ( $Q^{уд}$ ) определяется согласно выражению:

$$Q^{уд} = c \cdot m = 4,19 \cdot 20 = 83,8 \text{ кДж/} \cdot \text{}^\circ\text{C}, \quad (3)$$

где  $m$  – масса воды, кг;  $c$  – удельная теплоемкость воды, кДж/кг  $\cdot$   $^\circ\text{C}$ . В расчетах принимаем  $c = 4,19$  кДж/(кг  $\cdot$   $^\circ\text{C}$ )<sup>3</sup>.

Примем за базовые технологические условия начальную температуру воды  $T_n = 20 \cdot$   $^\circ\text{C}$  и необходимую температуру нагрева  $T_k = 60 \cdot$   $^\circ\text{C}$  ( $\Delta T = 40 \cdot$   $^\circ\text{C}$ ), тогда согласно выражению (2)  $Q_k = 3\ 352$  кДж.

Для определения относительной энергоёмкости процесса  $Q_s$  необходимы синхронные измерения и регистрация количества потребленной электрической энергии  $Q_n$  и тепловой энергии  $Q_k$ , находящейся в воде. Предельная эффективность процесса достигается, если (рис. 3, Теория) вся потребленная энергия  $Q_n$  расходуется на достижение результата процесса ( $Q_n = Q_k$ ;  $\tan \gamma_T = 45^\circ$ ), тогда относительная энергоёмкость по диаграмме определяется как отношение соответствующих отрезков во II квадранте:

$$Q_s^Q = \frac{Q_n}{Q_k} = \tan \gamma_T = 1. \quad (4)$$

Построение теоретического контура диаграммы заканчивается определением теоретического времени нагрева  $t_T$ , которое рассчитывается по значению номинальной мощности водонагревателя  $P_{ном}$ :

$$t_T = \frac{Q_k}{P_{ном}}. \quad (5)$$

В рассматриваемом примере  $t_T = 2\ 682$  с.

Таким образом после предварительного анализа были определены все теоретические параметры процесса ( $Q_k$ ,  $R$ ,  $t_T$ ), включая показатель максимальной энергетической эффективности (табл. 1).

Таблица 1

Данные для построения теоретического контура

$U_{ном}$ , В	$Q_k$ , кДж	Потери $\Delta Q$ , кДж	Время $t_T$ , с	$P_{ном}$ , кВт	$\alpha_1$	$Q_s^Q$
220	3 352	–	2 682	1,25	$51^\circ 43'$	1

<sup>3</sup> Теплоемкости удельные твердых веществ, жидкостей и газов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature>.

2. Построение диаграммы продолжается после получения экспериментальных данных, отражающих реальный процесс нагрева (табл. 2).

Таблица 2

Экспериментальные данные для построения 1 контура диаграммы

$U_{\text{ср}}, \text{В}$	$Q_{\text{н}}, \text{кДж}$	$Q_{\text{к}}, \text{кДж}$	Потери $\Delta Q, \text{кДж}$	Время $t_{\text{ф}}, \text{с}$	$P_{\text{н(ср)}}, \text{кВт}$	$P_{\text{к(ср)}}, \text{кВт}$	$\Delta P_{\text{(ср)}}, \text{кВт}$	$\alpha_1$	$Q_3^Q$	$Q_3^P$
220	4 215	3 352	866	3 330	1,267	1,007	0,260	51° 31'	1,258	1,258

Фактический нагрев, сопровождающийся измерениями энергии  $Q_{\text{н}}$ , времени  $t_{\text{ф}}$  и результата  $R$ , т. е. контролируемое физическое моделирование процесса, обнаруживает отклонение фактических показателей ( $Q_{\text{н}}, t$ ) кроме  $R$  от теоретических.

Регистрация и архивация действующих параметров процесса осуществлялась при помощи информационно-измерительной системы (ИИС), состоящей из электронного регистратора Ф1771-АД, датчиков тока ДТТ-03Т RMS, напряжения ДНТ-05 и температуры ДС054-50М. В предложенной ИИС значение потребленной электрической энергии  $Q_{\text{н}}$  рассчитывалось численными методами интегрирования, через измерение значений мощности  $P_{\text{н}}$ ; количество тепловой энергии  $Q_{\text{к}}$ , содержащееся в воде, определялось расчетным путем, через умножение результата действия энергии ( $\Delta T$ ) на удельный теоретический показатель  $Q^{y\lambda}$ . Использование математических каналов регистратора для реализации синхронных вычислительных процедур позволило автоматизировать процесс получения показателя  $Q_3$ , контролировать его значение на дисплее регистратора.

**Эксперимент № 1.** Определение "врожденной" энергоэффективности оборудования (нагрев заданного объема воды до заданной температуры при номинальном напряжении и температуре окружающей среды 22 °С).

На одной диаграмме может быть отложено несколько контуров, иллюстрирующих различные производственные условия, однако сравнение всегда будет проводиться с теоретическим контуром, отражающим наивысшую энергоэффективность. Для удобства построения каждому последующему контуру будем присваивать порядковый номер в соответствии с экспериментом, данные которого он отражает.

Из полученных данных видно, что в реальном процессе (рис. 3, Контур 1) передача энергии в объемном энергетическом элементе сопровождается потерями энергии ( $\Delta Q$ ), которые могут быть определены из выражения:

$$Q_{\text{н}} - Q_{\text{к}} = \Delta Q. \tag{6}$$

Если записать выражение (6) в дифференциальном виде, то получим выражение для определения потерь мощности  $\Delta P$ :

$$P_{\text{н(ср)}} \cdot t_{\text{ф}} - P_{\text{к(ср)}} \cdot t_{\text{ф}} = \Delta P_{\text{(ср)}} \cdot t_{\text{ф}}, \tag{7}$$

где  $t_{\text{ф}}$  – время нагрева, с;  $P_{\text{н(ср)}}$  – средняя потребляемая мощность, кВт;  $P_{\text{к(ср)}}$  – средняя действующая (виртуальная) мощность, кВт.

Значения средних мощностей ( $P_{\text{н(ср)}}$  и  $P_{\text{к(ср)}}$ ) определяется апостериорно по диаграмме:

$$P_{\text{н(ср)}} = \frac{Q_{\text{н}}}{t_{\text{ф}}} = \tan \alpha_1, \tag{8}$$

$$P_{\text{к(ср)}} = \frac{Q_{\text{к}}}{t_{\text{ф}}} = \tan \alpha_{\text{к}}. \tag{9}$$

3. Построение диаграммы заканчивается определением значения относительной энергоемкости реального процесса:

$$Q_3^Q = \frac{Q_{\text{н}}}{Q_{\text{к}}} = \tan \gamma_1 \text{ или } Q_3^P = \frac{P_{\text{н(ср)}}}{P_{\text{д(ср)}}}. \tag{10}$$

Данные, полученные в ходе эксперимента № 1, и расчетные параметры эффективности приведены в табл. 2.

Выводы по эксперименту № 1. Результатом проведенных исследований стало создание информационно-измерительной системы, позволяющей на экране регистратора получать показатель энергетической эффективности, что подтверждает правомерность использования МКО для оценки энергоэффективности отдельного ЭТП. При условии обеспечения подобными системами всех основных ЭТП на предприятии появляется возможность

создания системы мониторинга энергетической эффективности по показателю относительной энергоёмкости. Подобная система позволит обеспечить постоянный контроль за использованием ресурсов и определить оптимальную стратегию управления энергоёмкостью продукции. Таким образом специалисты энергетических служб предприятия получают возможность при помощи оперативного показателя влиять на устойчивость развития технической и экономической сфер деятельности производства.

В практике МКО используется метод построения зависимости  $P_n(P_k)$ , включающий характеристику идеального процесса в элементе при  $P_n = P_k$  (без потерь). Такая характеристика получила название энергетической. На основании данных, полученных в ходе измерений ( $P_n$ ) и расчетов ( $P_k$ ) для разобранный выше примера, была получена энергетическая характеристика исследуемого нагревателя. На рис. 3 представлена энергетическая характеристика электронагревателя ЭВБО-20/1,25 с дополнительными построениями, которые описывают основные соотношения параметров процесса и позволяют определить показатель энергетической эффективности  $Q_3^P$ .

Следует отметить, что общая особенность, присущая всем техническим элементам, заключается в том, что показатель энергоэффективности согласно МКО, должен определяться по отношению конечных энергий  $Q_n/Q_k$ , а энергетическая характеристика, необходимая для энергетических расчетов, – строиться для конечных показателей мощности  $P_n$  и  $P_k$ . Энергетический показатель эффективности  $Q_3$ , полученный расчетно-измерительным методом в процессе эксплуатации оборудования, на энергетической характеристике отображается точкой (рис. 5, точка 1), а процесс – движением точки по этой характеристике. Для построения было использовано множество промежуточных значений  $P_k$ , полученных согласно выражению

$$P_k = Q^{y_d} \cdot R' = Q^{y_d} \cdot \tan \beta_T. \quad (11)$$

Представленная на рис. 5 энергетическая характеристика процесса нагрева имеет вид облака, так как значение скорости нагрева не является постоянной величиной – график нагрева (рис. 3) слегка изогнут ( $\Delta T \neq \text{const}$ ), и это приводит к изменению действующей мощности  $P_k$ . Для удобства определения действующей мощности предлагается использовать усредненное значение производной результата ( $\Delta T'_{cp} = \tan \beta_1$ ).

Прямая *a* иллюстрирует идеальный процесс, в котором  $P_n = P_k$ ,  $\Delta P = 0$ ,  $Q_3^P = \text{tg } 45^\circ = 1$ .

В качестве базовой точки для дальнейшего анализа эффективности при помощи дополнительного построения (линия *b*) определим точку 1 с координатами  $P_{n(cp)} = 1,267$  кВт и  $P_{k(cp)} = 1,008$  кВт, которая отражает эффективность энергетического оборудования в момент достижения технологического результата процесса, т. е. при  $T_\phi = T_k$ .

Значение потерь мощности могут быть определены по характеристике графически (рис. 5) –  $\Delta P_{(cp)} = 0,260$  кВт. Относительная энергоёмкость процесса, исходя из построения  $Q_3^P = \text{tg } 51^\circ 31' = 1,258$ .

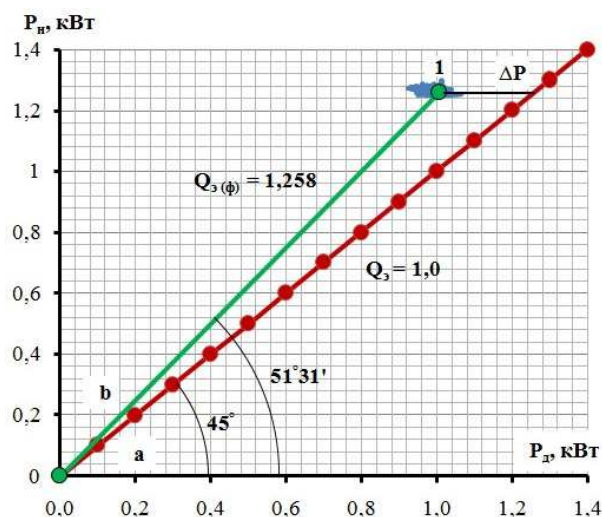


Рис. 5. Энергетическая характеристика водонагревателя ЭВБО-20/1,25

Приведенные построения доказывают принципиальную возможность использования энергетической характеристики в целях определения показателей энергетической эффективности отдельных энерготехнологических процессов по показателю относительной энергоёмкости  $Q_3$ . Таким образом, при условии нахождения энергетических характеристик для всех основных видов энергетического оборудования появляется полная информация для прогнозирования показателя энергоэффективности в каждом



энерготехнологическом процессе, что позволит усовершенствовать процесс принятия решения по управлению энергоемкостью продукции и тем самым обеспечить устойчивость развития ПЭС.

Для иллюстрации этого предположения были проведены дополнительные лабораторные исследования рассматриваемого процесса нагрева. Основные факторы, влияющие на его энергетическую эффективность, – изменения питающего напряжения и температуры окружающей среды. При помощи универсальной энергетической диаграммы для каждого эксперимента была определена относительная энергоемкость процесса, а отклонения от базового положения, вызванные влиянием приведенных факторов, отслеживались на энергетической характеристике.

Падение напряжения, вызванное неравномерностью нагрузки, приводит к снижению мощности нагревательного элемента, вследствие чего уменьшается его тепловая отдача. Значение установившегося отклонения напряжения по ГОСТ 32144–2013<sup>4</sup> не должно превышать ±10 % от номинального, однако на предприятиях АПК это значение зачастую выходит за установленные пределы, поэтому при определении энергетической характеристики оборудования были проведены эксперименты, предусматривающие два варианта отклонения напряжения питающей сети, которые были смоделированы в лабораторных условиях при помощи трансформатора.

**Эксперимент № 2** –  $U_{\text{факт}} = 0,9U_{\text{ном}} = 198 \text{ В}$ ;

**Эксперимент № 3** –  $U_{\text{факт}} = 0,8U_{\text{ном}} = 176 \text{ В}$ .

Таблица 3

Результаты экспериментов с отклонением питающего напряжения

№ п/п	$U_{\text{ср}}, \text{В}$	$Q_{\text{н}}, \text{кДж}$	$Q_{\text{к}}, \text{кДж}$	Потери $\Delta Q, \text{кДж}$	Время $t_{\text{ф}}, \text{с}$	$P_{\text{н}}(\text{ср}), \text{кВт}$	$P_{\text{к}}(\text{ср}), \text{кВт}$	$\Delta P(\text{ср}), \text{кВт}$	$\alpha_1$	$Q_3^Q$	$Q_3^P$
1	220	4 218	3 352	866	3 330	1,267	1,007	0,260	51° 31'	1,258	1,258
2	198	4 329	3 352	977	4 130	1,048	0,812	0,237	52° 14'	1,291	1,291
3	176	4 468	3 352	1 116	5 265	0,849	0,637	0,212	53° 7'	1,333	1,333

На рис. 6 представлена энергетическая характеристика водонагревателя ЭВБО-20/1,25 при различных вариантах отклонения питающего напряжения и  $T_{\text{окр}} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ . Объединение полученных точек в общий график и его дальнейшая линейная аппроксимация позволили выявить функциональную зависимость относительной энергоемкости от питающего напряжения  $P_{\text{н}} = 1,1298(P_{\text{д}}) + 0,13$ .

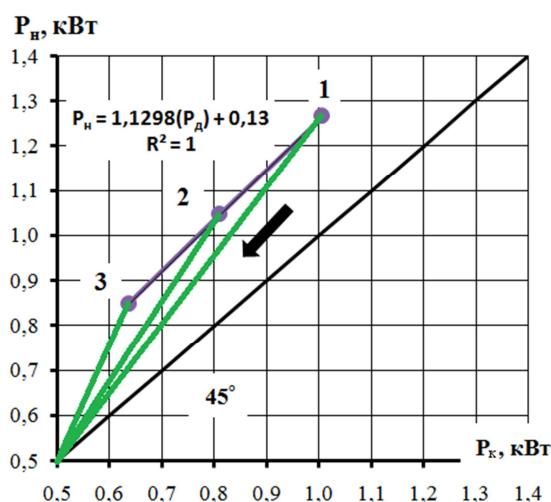


Рис. 6. Энергетическая характеристика водонагревателя ЭВБО-20/1,25 при различных вариантах отклонения питающего напряжения ( $T_{\text{окр}} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Анализ энергетической характеристики позволяет выявить общие закономерности изменения эффективности процесса нагрева вследствие снижения питающего напряжения: уменьшение потребляемой мощности  $P_{\text{н}}$  и действующей мощности  $P_{\text{к}}$ , влечет за собой снижение мощности потерь  $\Delta P$ , однако при этом растет интегральное значение потерь энергии  $\Delta Q$  в связи с увеличением времени протекания процесса  $\Delta t$ ,

<sup>4</sup> ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М. : Стандартинформ, 2013.

следствием чего является увеличение относительной энергоёмкости  $Q_3^Q$ . На энергетической характеристике (рис. 6) снижение питающего напряжения отражается смещением точек 2 и 3 вниз и влево, относительно базовой точки 1. При этом все точки лежат на прямой, описываемой функцией  $P_n = 1,1298(P_d) + 0,13$ . Такая закономерность в расположении точек позволяет точно определять относительную энергоёмкость для любых промежуточных значений потребляемой мощности. Таким образом, при наличии подобной характеристики для нового оборудования в практическом производстве появляется возможность контролировать энергоэффективность простым сравнением текущих параметров эффективности с заводскими.

Вторым существенным фактором, влияющим на энергетическую эффективность процесса нагрева, является температура окружающей среды. Увеличение разности температур между нагреваемой и окружающей средой приводит к увеличению тепловых потерь через ограждающую поверхность бака нагревателя.

Для определения влияния температуры окружающей среды на эффективность процесса нагрева был проведен эксперимент № 4 при  $T_{окр} = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Выбранная температура окружающей среды, согласно паспортным данным исследуемого нагревателя<sup>5</sup>, является минимально допустимой для его эксплуатации.

**Эксперимент № 4** –  $U_{факт} = 220 \text{ В}$ ,  $T_{окр} = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Таблица 4

Результаты экспериментов с различной температурой окружающей среды

№ п/п	$U_{ср}$ , В	$Q_{н}$ , кДж	$Q_{к}$ , кДж	Потери $\Delta Q$ , кДж	Время $t_{ф}$ , с	$P_{н(ср)}$ кВт	$P_{к(ср)}$ кВт	$\Delta P_{(ср)}$ кВт	$\alpha_1$	$Q_3^Q$	$Q_3^P$
1	220	4 218	3 352	866	3 330	1,267	1,007	0,260	$51^\circ 31'$	1,258	1,258
4	209	4 687	3 352	1 335	3 750	1,250	0,894	0,356	$54^\circ 26'$	1,398	1,398

Анализ полученной энергетической характеристики (рис. 7, а) позволяет выявить общие закономерности изменения эффективности процесса нагрева: при снижении температуры окружающей среды, в пределах допустимых паспортных значений водонагревателя, происходит уменьшение действующей мощности  $P_k$ , вызванное увеличением мощности потерь  $\Delta P$  и интегрального значения потерь энергии  $\Delta Q$ , что приводит к снижению эффективности процесса. На энергетической характеристике это отражается смещением точки 4 влево относительно базовой точки 1. Следует отметить, что в эксперименте № 4 питающее напряжение на 5 % ниже номинального, поэтому точка 4 находится ниже точки 1.

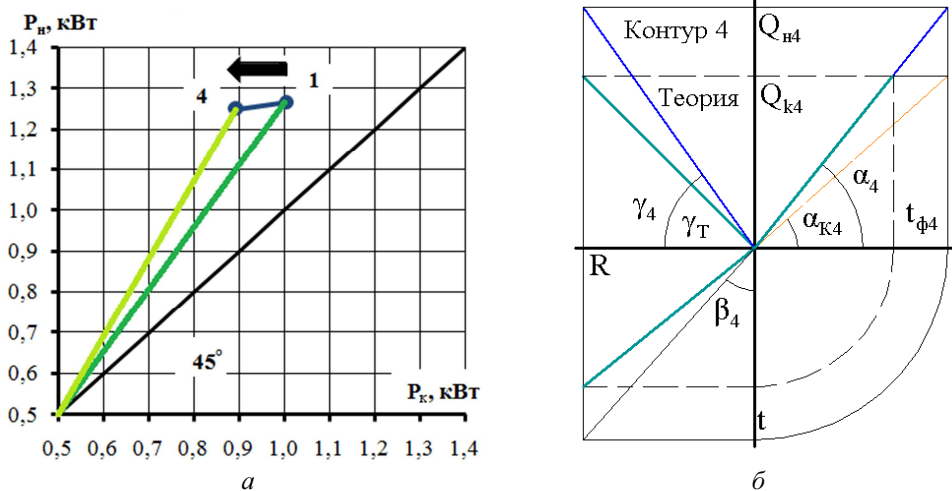


Рис. 7: а – энергетическая характеристика водонагревателя ЭВБО-20/1,25 при различных значениях окружающей температуры (1 °С и 22 °С); б – диаграмма процесса для эксперимента № 4

Одним из перспективных направлений использования энергетической характеристики на предприятиях АПК является проведение верификации мероприятий по энергосбережению. В качестве примера проведем анализ распространенного типового решения – применение теплоизоляции для сокращения потерь тепла через поверхность бака нагревателя. Для его реализации была выбрана теплоизоляция марки "Алюфом" (коэффициент теплопроводности изоляции  $\lambda = 0,038 \text{ Вт/м}\cdot\text{ }^\circ\text{C}$ )<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> Характеристики водонагревателя ЭВБО-20/1 Элвин [Электронный ресурс]. URL: <http://www.teplousezon.ru/shop/56/570>.

<sup>6</sup> Отражающая изоляция Алюфом. Технические характеристики [Электронный ресурс]. URL: <http://www.resurssltd.ru/catalog/folgirovannyye-materialy/alufom/>.



Эксперимент № 5 –  $U_{\text{факт}} = 220 \text{ В}$ ,  $T_{\text{окр}} = 22 \text{ }^\circ\text{С}$ , теплоизоляция "Алюфом".

Таблица 5

Результаты экспериментов с применением изоляции корпуса нагревателя

№ п/п	$U_{\text{ср}}$ , В	$Q_{\text{н}}$ , кДж	$Q_{\text{к}}$ , кДж	Потери $\Delta Q$ , кДж	Время $t_{\text{ф}}$ , с	$P_{\text{н(ср)}}$ , кВт	$P_{\text{к(ср)}}$ , кВт	$\Delta P_{\text{(ср)}}$ , кВт	$\alpha_1$	$Q_3^Q$	$Q_3^P$
1	220	4 218	3 352	866	3 330	1,267	1,007	0,260	$51^\circ 31'$	1,258	1,258
5	220	4 084	3 352	732	3 230	1,264	1,038	0,227	$50^\circ 36'$	1,218	1,218

Анализ энергетической характеристики (рис. 8, а) позволяет выявить общие закономерности изменения эффективности процесса нагрева: применение изоляции корпуса нагревателя сокращает мощность потерь  $\Delta P$ , а также интегральное значение потерь энергии  $\Delta Q$ , тем самым повышая эффективность процесса. На энергетической характеристике это отражается смещением точки 5 вправо относительно базовой точки 1.

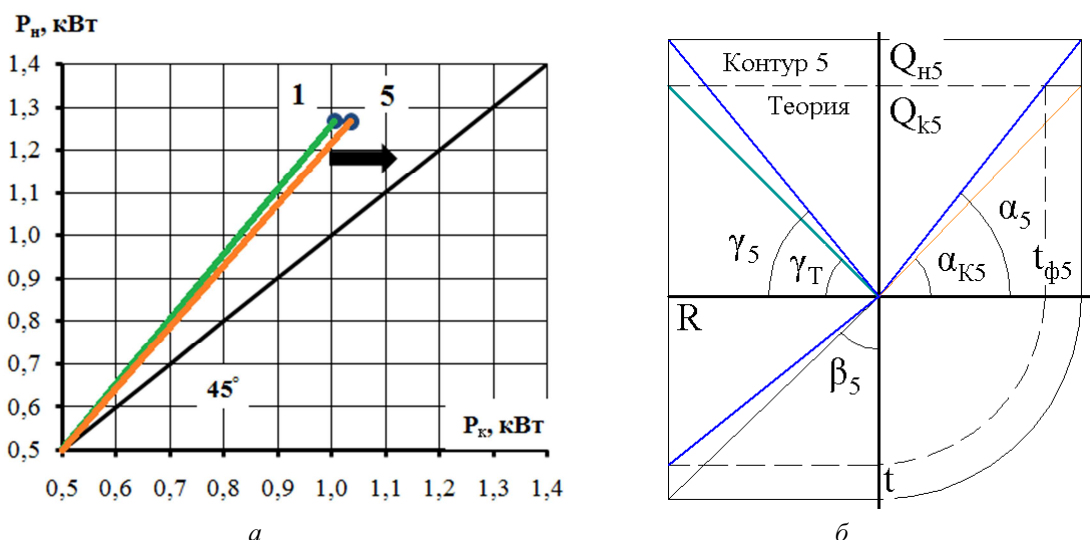


Рис. 8: а – энергетическая характеристика водонагревателя ЭВБО-20/1,25 при использовании изоляции корпуса водонагревателя ( $22 \text{ }^\circ\text{С}$ ); б – диаграмма процесса для эксперименте № 5

### Заключение

Энергетическая характеристика является удобным инструментом, используемым в электроприводе для выбора электродвигателей, однако для других типов оборудования она не получила широкого распространения. Описанная методика позволяет проводить построения энергетических характеристик для распространенных видов энергетического оборудования, что впоследствии может быть использовано в повседневной практике энергетиков для обеспечения устойчивого развития предприятий.

Для построения энергетических характеристик необходимо сочетание измерений энергии на входе энергетического элемента  $Q_{\text{н}}$  и результата технологического процесса  $R$  с их последующей математической обработкой и визуализацией. Энергетическая характеристика позволяет выявлять показатели энергетической эффективности действующего оборудования по алгоритмам МКО.

Основной особенностью представленных энергетических характеристик является использование при построении значений действующей мощности  $P_{\text{к}}$ , определяющей ту часть потребленной мощности  $P_{\text{н}}$ , которая непосредственно реализует технологический результат  $R$ .

Диагностика действующего оборудования с помощью энергетической характеристики позволила численно оценить причины изменения показателя эффективности процесса нагрева по его отклонению от базового значения, соответствующего функционированию в нормальных условиях.

Представленный анализ типового энергосберегающего мероприятия доказывает, что энергетическая характеристика может быть использована на производстве для верификации мер по энергосбережению. В приведенном примере применение теплоизоляции "Алюфом" позволило сократить потери энергии на 15,48 % относительно базового уровня.

**Библиографический список**

1. Наше общее будущее : доклад Международной комиссии по окружающей среде и развитию (МКОСР) : пер. с англ. / под ред. С. А. Евтеева, Р. А. Перелета. М. : Прогресс, 1989.
2. Карпов В. Н., Юлдашев З. Ш. Энергосбережение. Метод конечных отношений : монография. СПб. : СПбГАУ, 2010. 146 с.
3. Карпов В. Н. Введение в энергосбережение : монография. СПб. : СПбГАУ, 1999. 73 с.

**References**

1. Nashe obschee budushee [Our common future] : doklad Mezhdunarodnoy komissii po okruzhayushey srede i razvitiyu (MKOSR) : per. s angl. / pod red. S. A. Evteeva, R. A. Pereleta. M. : Progress, 1989.
2. Karpov V. N., Yuldashev Z. Sh. Energoberezhenie. Metod konechnyh otnosheniy [Energy saving. The method of finite relations] : monografiya. SPb. : SPbGAU, 2010. 146 p.
3. Karpov V. N. Vvedenie v energoberezhenie [Introduction to energy conservation] : monografiya. SPb. : SPbGAU, 1999. 73 p.

**Сведения об авторах**

**Карпов Валерий Николаевич** – ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный аграрный университет", кафедра энергообеспечения производств и электротехнологии, д-р техн. наук, профессор; e-mail: kvn\_39@mail.ru

**Karpov V. N.** – Saint-Petersburg State Agrarian University, Department of Power Supply Facilities and Electrotechnology, Dr of Tech. Sci.; e-mail: kvn\_39@mail.ru

**Немцев Иван Алексеевич** – ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный аграрный университет", кафедра энергообеспечения производств и электротехнологии, аспирант; e-mail: ivan\_nemcev@bk.ru

**Nemtsev I. A.** – Saint-Petersburg State Agrarian University, Department of Power Supply Facilities and Electrotechnology, Ph.D. Student; e-mail: ivan\_nemcev@bk.ru