

УДК 664.951.65

В. Н. Карпов, А. А. Немцев

Определение энергетической эффективности на этапе проектирования предприятия методом конечных отношений

V. N. Karpov, A. A. Nemtsev

Determination of energy efficiency in the design phase of the enterprise by the method of finite relations

Аннотация. Рассмотрен алгоритм оценки инженеринговых решений на стадии проектирования по показателю относительной энергоёмкости с помощью метода конечных отношений (МКО). Приведены описание и схема потребительской энергетической системы, выступающей в роли базового объекта при анализе эффективности использования энергии с целью производства продукции. Выявлены основные особенности использования метода конечных отношений на этапе проектирования. На основании энергетической оценки доказана целесообразность использования интегрального подхода к проектированию для повышения эффективности использования энергии на предприятиях АПК.

Abstract. The algorithm for estimating engineering solutions at the design stage in terms of the relative energy intensity by means of the finite relations has been considered. The description and diagram of energy consumer system serving as the base object in analysis of energy efficiency for production of products have been given. The basic features of using the finite relations' method at the design stage have been revealed. Based on energy estimation the usefulness of the integrated approach to design for improving the energy efficiency of agricultural enterprises has been proved.

Ключевые слова: энергосбережение, энергоёмкость, потребительская энергетическая система, метод конечных отношений, интегральный подход к проектированию.

Key words: energy efficiency, energy intensity, energy consumer system, the method of finite relations, integrated approach to the design.

Введение

В настоящее время одним из приоритетных направлений инновационного развития России, согласно Федеральному закону № 261-ФЗ "Об энергосбережении", является повышение эффективности использования энергии и уменьшение негативных воздействий хозяйственной деятельности на окружающую среду и здоровье населения. Современные требования к энергетической эффективности, сформулированные Министерством энергетики РФ [1], относятся уже не просто к повышению ее значения, а к двукратному ускорению темпов этого повышения с тем, чтобы уверенно достичь намеченного на 2020 год целевого показателя снижения энергоёмкости ВВП РФ на 40 % относительно 2010 г. (рис. 1).

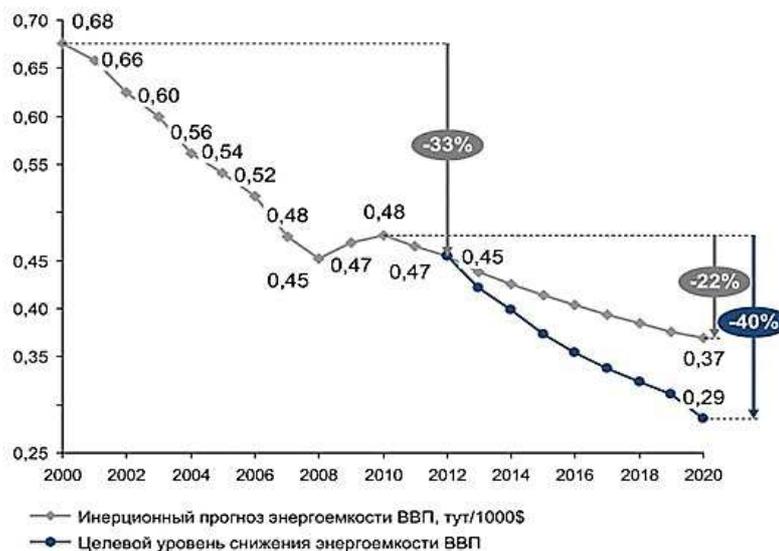


Рис. 1. Энергоёмкость ВВП России 2000–2020 гг., тут/1 000\$

Как показал достаточно продолжительный опыт исследований и практической работы в СПбГАУ по производственному энергосбережению, поставленная цель повышения энергоэффективности не может быть достигнута только типовыми решениями (например, заменой ламп накаливания на светодиоды). Установлено, что управлению должна подвергаться вся потребительская энергетическая система (ПЭС) [2], основным показателем энергетической эффективности которой является энергоёмкость продукции, легко конвертируемая в относительный энергетический и валютный показатель для любого масштаба производства (от отдельного предприятия до ВВП страны).

Узаконенное требование повышения эффективности использования энергии (т. е. требование, выведенное в ранг государственной политики) обязывает не только критически анализировать все этапы жизненного цикла агроинженерных систем АПК с точки зрения энергоэффективности, но и разрабатывать новые методы синтеза, удовлетворяющие требованиям снижения энергоёмкости и служащие развитием методов выбора оборудования.

Энергетический кризис, разыгравшийся в странах Западной Европы в 1970–80-е гг., когда цены на энергоресурсы выросли в несколько раз, заставил искать эффективные способы контроля расходования энергоресурсов. Появились концепции энергетического менеджмента, энергетического аудита, целевого энергетического мониторинга. Принятые меры дали значительные результаты, так, за последние два десятилетия энергоёмкость производства в этих странах снижена в среднем вдвое. Интегральный подход в зарубежной проектной практике рассматривается в качестве ключевой стратегии достижения экономической эффективности технических систем и снижения их негативного воздействия на окружающую среду [3, с. 32]. В России этот подход не получил широкого распространения ввиду отсутствия специальной отечественной литературы и научных исследований, посвященных этому вопросу.

Первое переводное издание, детально излагающее передовой опыт в проектировании эффективных технических систем, – книга австралийских ученых "Проектирование систем как единого целого. Интегральный подход к инжинирингу для устойчивого развития" [3]. Следует отметить, что в этой книге изложен накопленный проектный и инженерный опыт, позволяющий создавать экологичные и экономичные системы, обеспечивающие устойчивое развитие, однако отсутствует обобщающий метод оценки энергоэффективности предлагаемых проектных решений, что осложняет применение описанных приемов для практического энергосбережения.

Целью данной статьи является описание актуальных подходов к решению задач энергосбережения, возникающих на этапе проектирования предприятия, обоснование возможности применения МКО для оптимизации проектных решений по показателю энергетической эффективности.

Основные теоретические положения

Агроинженерная потребительская энергетическая система (ПЭС) создается на основе схемы размещения оборудования путем дополнения энерготехнологическими процессами (ЭТП), предусмотренными технологией производства продукции [2]. Схема ПЭС приведена на рис. 2.

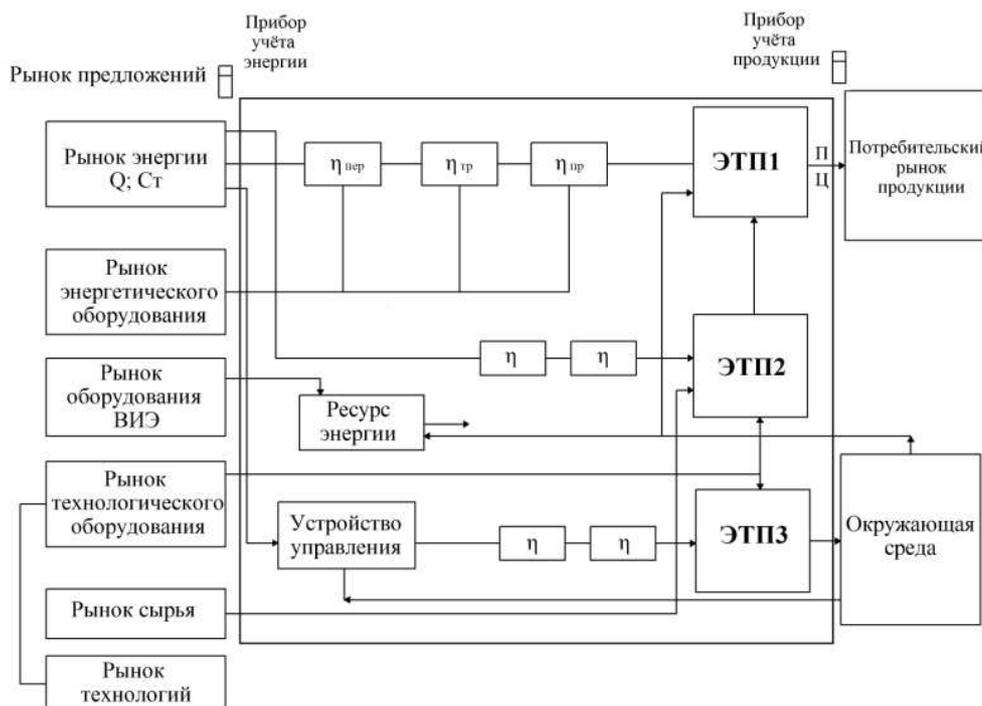


Рис. 2. Схема потребительской энергетической системы

Эта схема включает все энергетическое оборудование предприятия АПК, но распределенное по линиям, образованным непрерывными однонаправленными потоками энергии, используемой в энерготехнологическом процессе. Все множество ЭТП предприятия распределено по трем видам: ЭТП1 – основной, выпускающий продукцию, ЭТП2 – вспомогательные, ЭТП3 – обеспечивающие условия жизнедеятельности. Важно, что энергетический процесс в каждом ЭТП создает численно *измеряемый результат*, необходимый для получения продукции. Таким образом, ПЭС не формальное объединение элементов, а *совокупность процессов*, объединенных одной целью – выпуск продукции. Очевидно, что только целенаправленное управление энергетическими процессами всей потребительской системы позволит уменьшать значение общего производственного критерия эффективности – энергоемкости продукции. Поскольку в общее число результатов анализируемых процессов входит и выпускаемая предприятием продукция, то ПЭС следует считать *основным и начальным объектом в иерархии производственных объединений* при системных анализах эффективности энергоиспользования по критерию энергоемкости продукции.

Включение в схему и в анализ эффективности использования энергии ЭТП должно рассматриваться не как дополнение к какой-то основе, а наоборот, как создание аналитической базы для оценки системного потребления энергии, так как все ЭТП подчинены технологии выпуска продукции. Для каждого результата ЭТП известен вид энергии. Сравнение видов, необходимых для получения результатов и набора видов потребляемой энергии, определяет количество преобразователей в ПЭС. Однако самое главное достоинство включения ЭТП в схему ПЭС заключается в том, что в анализ вводятся *научные показатели*, прямо или косвенно определяющие теоретический удельный (на единицу результата процесса) расход энергии $Q^{yд}$. Таким образом, МКО получил научную основу в виде удельных показателей и стал основным методом анализа энергоэффективности потребительских энергетических систем [4]. Разработка методов использования МКО для конкретных ЭТП, результатов R и энергетических линий является задачей научных исследований, обобщение которых создаст теорию энергоэффективности.

Для достижения поставленной в начале статьи цели рассмотрим пример из книги [3, с. 165] "Промышленные насосные системы" с сохранением основных формул и расчетных значений, а затем при помощи показателей энергоэффективности, принятых в МКО, дадим оценку принятым проектным решениям.

Пример реализации

Основными задачами проектирования является выбор мощности насоса P и определение диаметра трубопровода D , которые реализуют технологический процесс перекачивания воды из резервуара A до крана, при соблюдении следующих технологических требований: температура перекачиваемой жидкости $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, целевая объемная скорость потока на выходе $W = 0,001\text{ м}^3/\text{с}$. Общая схема помещения с расположением оборудования изображена на рис. 3.



Рис. 3. Схема технологического процесса

1. Особенности применения метода конечных отношений для оценки проектных решений

Для проведения энергетической оценки проектных решений предлагается использовать МКО [4], разработанный в СПбГАУ коллективом научной школы "Эффективное использование энергии" (рук. – профессор Карпов В. Н.). Возможности данного метода были подтверждены в лабораторных и производственных условиях при определении фактических показателей энергоэффективности действующего оборудования [5], однако пример оценки и оптимизации проектных решений излагается впервые.

В МКО принято считать, что технологический процесс потребляет энергию с целью совершения действия, приводящего к появлению нужного результата R . Поэтому для оценки энергетической эффективности получаемого в энерготехнологическом процессе результата, необходимо, по известным научно обоснованным показателям, установить удельный расход энергии $Q^{yд}$ (на единицу результата) [4]. Умножение удельного

расхода энергии Q^{yA} на количественное значение заданного результата R определяет минимальный расход энергии $Q_{\text{теор}}$ (без учета потерь):

$$Q_{\text{теор}} = Q^{yA} \cdot R. \quad (1)$$

Дифференцирование тождества (1) по времени t дает следующее выражение:

$$P_{\text{теор}} = P^{yA} \cdot R. \quad (2)$$

Стоит отметить, что в рассматриваемом случае значение результата R является дифференциальным, так как целевая объемная скорость потока задана в условии в виде постоянной величины. Отношение $P_{\text{теор}}/R = P^{yA} = \text{const}$ и, следовательно, $P_{\text{теор}}/P^{yA} \cdot R = 1$ представляет собой абсолютную энергоемкость R и относительную энергоемкость процесса, которая для теоретических условий (отсутствие потерь энергии) равна 1. Указанные значения параметров ($Q_{\text{теор}}$, $P_{\text{теор}}$) минимальны, потому что при меньших значениях прекратится целевое функционирование ЭТП, т. е. прекратится выработка результата R . Подобный подход к рассмотрению технологического процесса делает задачу энергосбережения оптимизационной, решение которой заключается не в снижении потребления энергии, а в обеспечении определенного, научно-обоснованного минимума энергоемкости получения результата (производства продукции).

В рассматриваемом примере теоретическое значение мощности, гарантирующее получение заданного результата действии насосной системы (объемная скорость потока на выходе крана W) определяется согласно выражению (2):

$$P_{\text{теор}} = P^{yA} \cdot W. \quad (3)$$

Удельная мощность, необходимая для реализации рассматриваемого процесса может быть определена исходя из заданного напора жидкости H , ее плотности ρ и ускорения свободного падения g :

$$P^{yA} = \rho \cdot g \cdot H. \quad (4)$$

Тогда, используя формулу (3), получим численное значение мощности:

$$P_{\text{теор}} = 998,2 \cdot 9,81 \cdot 10 \cdot 0,001 = 97,92 \text{ Вт.}$$

Значение мощности $P_{\text{теор}}$ является минимально необходимым и объективным для осуществления целевого функционирования ЭТП и при этом не зависит от уровня инжиниринга, конструкции системы, энергетического и технического оборудования.

Согласно МКО, отношение расчетной мощности установки $P_{\text{проект}}$ к теоретической $P_{\text{теор}}$, есть величина, характеризующая относительную энергоемкость ЭТП. Этот показатель предлагается называть относительной энергоемкостью по данным проекта $Q_{\text{э}}^p$ и использовать в дальнейшем при оценке инжиниринговых решений:

$$Q_{\text{э}}^p = \frac{P_{\text{проект}}}{P_{\text{теор}}}, \text{ при } 1 < Q_{\text{э}}^p < +\infty. \quad (5)$$

Таким образом, $Q_{\text{э}}^p$ может выступать в роли критерия оптимизации, который численно определяем и положен в основу энергетических оценок решений, принимаемых в процессе проектирования.

2. Общее решение задачи проекта

Энергетический баланс потока между точкой 1 и точкой 2 (рис. 3) для данной системы задается в общем виде уравнением Бернулли:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + z_1 + \sum \frac{P_i}{\rho g A_i V_i} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + z_2 + \sum f_i \left(\frac{L_i}{D_i} \right) \left(\frac{V_i^2}{2g} \right) + \sum K_{L_i} \frac{V_i^2}{2g}, \quad (6)$$

где p – давление, Па; ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; α – поправочный коэффициент Кориолиса; V – средняя скорость, м/с ; z – высота, м ; h – потеря напора жидкости, м ; f – коэффициент трения; L – длина трубопровода, м ; D – диаметр трубопровода, м ; K_{L_i} – коэффициент потерь напора; P – мощность насоса, Вт .

С учетом конфигурации данной системы можно сделать несколько упрощений и подстановок: $p_1 = p_2 = 0$ (атмосферное давление), $V_1 = 0$, $z_1 = 0$.

Так как выходное отверстие из резервуара A имеет совершенную круглую форму, предположим, что соответствующими частичными потерями можно пренебречь. Диаметр трубопровода по всей длине

имеет одинаковую величину D , следовательно, площадь поперечного сечения по всей длине трубопровода равна A и средняя скорость потока жидкости на выходе насоса постоянна и равна V_2 .

Предположим, что потери напора воды на штуцерах насоса, штуцерах крана и на выходном отверстии резервуара A пренебрежимо малы, следовательно, уравнение энергетического баланса (6) может быть преобразовано в следующий вид:

$$\frac{P}{\rho g A V_2} = \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + z_2 + f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{V_2^2}{2g} \right) + \sum K_{Li} \frac{V_2^2}{2g}. \quad (7)$$

Параметр V_2 можно исключить из уравнения энергетического баланса, заменив его функцией величин W и D , используя уравнение:

$$V_2 = \frac{W}{A} = \frac{4W}{\pi D^2}. \quad (8)$$

Используя необходимые преобразования, получим следующую формулу для определения мощности насоса для данного варианта системы:

$$P = \left(\frac{8\rho W^3}{\pi^2 D^4} \right) \left[\alpha_2 + f \left(\frac{L}{D} \right) + \sum K_{Li} \right] + \rho g W z_2. \quad (9)$$

Коэффициент трения f зависит и от числа Рейнольдса Re , которое определяется из выражения

$$Re = \frac{\rho V_2 D}{\mu}, \quad (10)$$

где μ – динамическая вязкость жидкости, $H \cdot c/m^2$;

Подставив выражение значение (8) в выражение (10), получаем

$$Re = \frac{4\rho W}{\pi D \mu}. \quad (11)$$

Для турбулентного потока ($Re > 4\,000$) для определения параметра f необходимо знать эквивалент шероховатости внутренней поверхности трубопровода ε , представляющий собой известную физическую характеристику трубопровода.

Таким образом, определена взаимосвязь между мощностью насоса P и диаметром трубопровода D при использовании известных переменных параметров системы.

3. Инжиниринг при традиционном подходе к проектированию систем

Произведем выбор оборудования (труб и насоса подходящей мощности P) для насосной системы. Исходя из табличных значений для воды при температуре $20\text{ }^\circ\text{C}$, плотность $\rho = 998,2\text{ кг/м}^3$, динамическая вязкость $\mu = 1,002 \cdot 10^{-3}\text{ Н}\cdot\text{с/м}^2$. На рис. 4 приведено типичное решение для любой системы с одним насосом и одним трубопроводом.

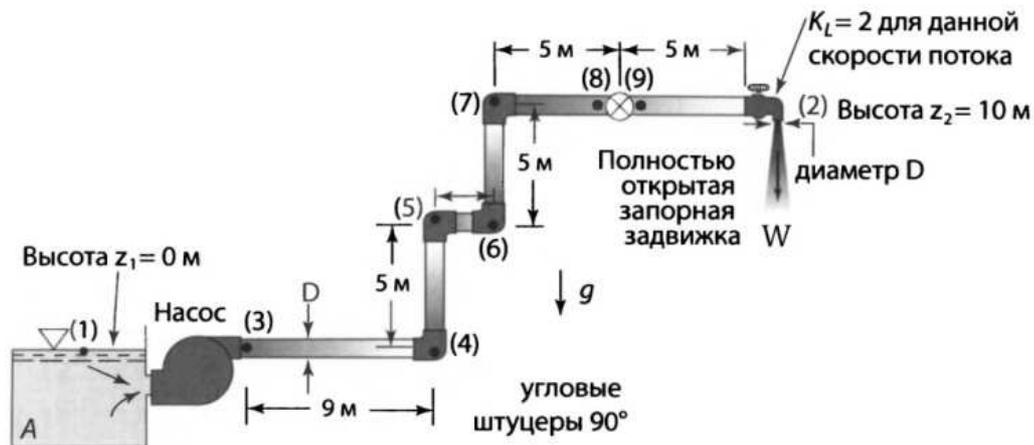


Рис. 4. Типичная конфигурация системы

Рассчитаем число Рейнольдса, используя выражение (10):

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot 998,2 \cdot 0,001}{3,14 \cdot 1,002 \cdot 10^{-3} D} = \frac{1268}{D}. \quad (12)$$

Поток будет турбулентным ($\text{Re} > 4\,000$) при $D < 0,317$ м. Диаметр трубы $D = 0,317$ м значительно превышает тот, который приемлем для системы, изображенной на рис. 2, поэтому без всякого риска можно полагать, что поток является турбулентным. Так как турбулентный профиль скорости почти однороден по всей длине трубопровода, принимаем, что $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$.

Для резьбовых угловых штуцеров 90° значения коэффициента потерь напора составят:

$$K_{L4} = K_{L5} = K_{L6} = K_{L7} = 1,5.$$

Для полностью открытого шарового клапана $K_{Lш} = 10$ и крана $K_{LK} = 2$.

После подстановки всех известных величин, уравнение энергетической мощности (9) приобретет вид:

$$P = \left(\frac{8 \cdot 998,2 \cdot (0,001)^3}{\pi^2 D^4} \right) \left[1 + f \left(\frac{30}{D} \right) + (1,5 \cdot 4 + 10 + 2) \right] + 998,2 \cdot 9,81 \cdot 0,001 \cdot 10,$$

$$P = \left(\frac{8,0911 \cdot 10^{-7}}{D^4} \right) \left[f \left(\frac{30}{D} \right) + 19 \right] + 97,923.$$

Предположим, что для изготовления трубопровода используются тннутые медные трубы диаметром $D = 0,015$ м. Подставим это значение в уравнение (12) для вычисления числа Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{1\,268,411}{0,015} = 84561.$$

Для тннутых труб эквивалент шероховатости $\varepsilon = 0,0015$ мм, таким образом

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,0015}{15} = 0,0001.$$

Коэффициент трения $f = 0,0195$ при $\text{Re} = 84561$ и $\varepsilon/D = 0,0001$, следовательно:

$$P = \left(\frac{8,0911 \cdot 10^{-7}}{0,015^4} \right) \left[0,0195 \left(\frac{30}{0,015} \right) + 19 \right] + 97,923 = 1\,025 \text{ Вт}.$$

Таким образом, если в системе, изображенной на рис. 2, используются тннутые медные трубы диаметром $D = 0,015$ м, то для обеспечения объемной скорости потока на выходе $W = 0,001$ м³/с требуется насос мощностью $P = 1\,025$ Вт.

Показатель энергетической эффективности инжинирингового решения при традиционном проектировании по выражению (5) составит:

$$Q_{\Sigma}^P (\text{проект}) = \frac{1\,025}{97,92} = 10,468.$$

Исходя из полученного значения проектной эффективности, можно сделать вывод о том, что данная система имеет большой потенциал в сфере энергосбережения и должна быть оптимизирована.

4. Инжиниринг при интегральном подходе к проектированию систем

Интегральный (комплексный подход) – это процесс проектирования систем как единого целого, в ходе которого активно рассматриваются взаимодействия между подсистемами и системами, и решения подыскиваются таким образом, чтобы одно и то же решение устраняло сразу несколько проблем [3, с. 35]. Исходя из данного определения, были сформулированы основные недостатки инжиниринговых решений при традиционном подходе к проектированию:

- конфигурация трубопровода предполагает потери напора воды, которых можно было бы избежать (конфигурация трубопровода выбрана с учетом схемы размещения оборудования и окна, но не является оптимальным с точки зрения эффективности);
- при процедуре выбора диаметра труб D и мощности насоса P система как целое не рассматривалась (не установлена связь между этими показателями).

На основании вышеизложенных причин, процесс проектирования дополняется двумя этапами, которые проводятся с целью совершенствования системы и призваны обеспечить ее максимальную эффективность.

Этап 1: Оптимизация конструкции (снижение потерь напора)

На данном этапе в конструкцию трубопровода вносятся изменения, учитывающие схему размещения оборудования и позволяющие снизить потери напора (рис. 5).

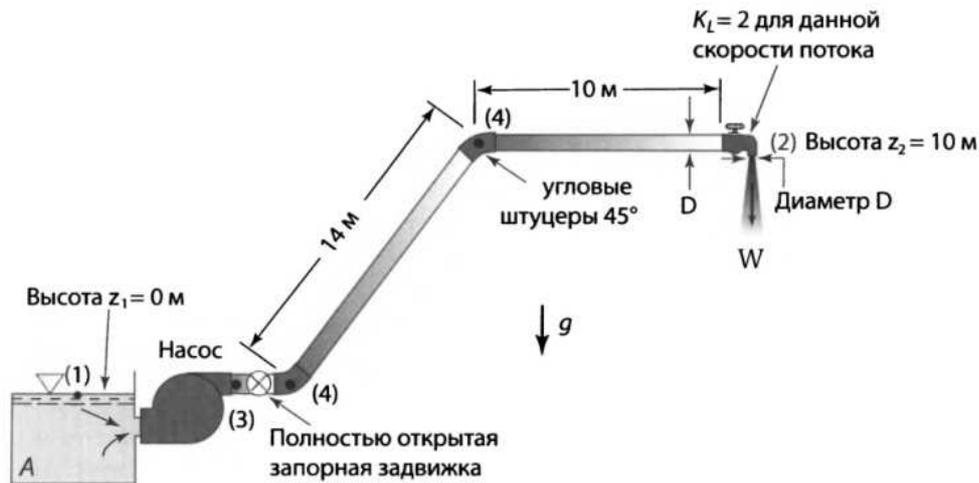


Рис. 5. Решение при интегральном проектировании

Так как условия для точки 1 и точки 2 на рис. 4 такие же, как и на рис. 5, и используется один трубопровод и один насос, то применимо уравнение энергетического баланса, описанное выражением (7). Для резьбовых угловых штуцеров 45°: $K_{L4} = K_{L5} = 0,4$; для полностью открытой запорной задвижки $K_{L3} = 0,15$; крана $K_{LK} = 2$.

Уравнение энергетического баланса приобретает вид

$$P = \left(\frac{8,0911 \cdot 10^{-7}}{D^4} \right) \left[f \left(\frac{24}{D} \right) + 3,95 \right] + 97,923.$$

Предположим, что в данном случае выбраны те же тянутые медные трубы диаметром $D = 0,015$ м. Подставим это значение в уравнение (10) для вычисления числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{1\,268,411}{0,015} = 84\,561.$$

Для тянутых труб $\varepsilon = 0,0015$ мм, таким образом:

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,0015}{15} = 0,0001.$$

Коэффициент трения $f = 0,0195$ при $Re = 84\,561$ и $\varepsilon/D = 0,0001$, следовательно:

$$P = \left(\frac{8,0911 \cdot 10^{-7}}{0,015^4} \right) \left[0,0215 \left(\frac{24}{0,015} \right) + 3,95 \right] + 97,923 = 660 \text{ Вт}.$$

Таким образом, если в системе, изображенной на рис. 5, используются тянутые медные трубы диаметром $D = 0,015$ м, то для обеспечения объемной скорости потока на выходе $W = 0,001$ м³/с требуется насос мощностью $P = 660$ Вт.

Показатель энергетической эффективности инженерингового решения на первом этапе совершенствования системы по принципам интегрального подхода к проектированию согласно выражению (5) составит:

$$Q_{\varepsilon(\text{проект})}^P = \frac{660}{97,92} = 6,740.$$

На этапе 1 была оптимизирована конструкция трубопровода, что привело к ряду улучшений системы. При диаметре трубопровода ($D = 0,015$ м), который был выбран при традиционном проектировании, решение, полученное при интегральном проектировании, обеспечивает снижение проектной мощности на 64 % и снижение относительной энергоемкости по данным проекта $Q_{\varepsilon(\text{проект})}^P$ с 10,467 до 6,740.

Этап 2: Оптимизация мощности насоса

На данном этапе проводится комплексная оптимизация диаметра трубопровода D и мощности насоса P . Согласно уравнению (9) увеличение диаметра D приводит к резкому снижению требуемой мощности P . Комбинации величин диаметра труб и мощности насоса (с шагом увеличения диаметра 0,005 м.) подходящие для системы (рис. 5), рассчитаны аналогичным способом. Результаты расчета, а также общие капитальные затраты приведены авторами рабочего примера и дополнительно не проверялись, однако для каждого предложенного варианта была проведена энергетическая оценка по показателю $Q_{э}^P$ (табл. 1).

Таблица 1

Расчет величин мощности насоса для ряда величин диаметра труб

Номер варианта	D , м	Re	f	P , Вт	Капитальные затраты, \$	$Q_{э}^P$ (проект)
1	0,015	84 561	0,0195	660	959	6,740
2	0,02	63 421	0,0205	242	1 076	2,471
3	0,025	50 736	0,0210	148	1 158	1,511
4	0,03	42 280	0,0215	119	1 245	1,215
5	0,04	31 710	0,0230	104	1 457	1,062

Согласно полученным данным построены зависимости относительной энергоёмкости по проекту $Q_{э}^P$ и общие капитальные затраты для соответствующих вариантов оптимизации (рис. 6).

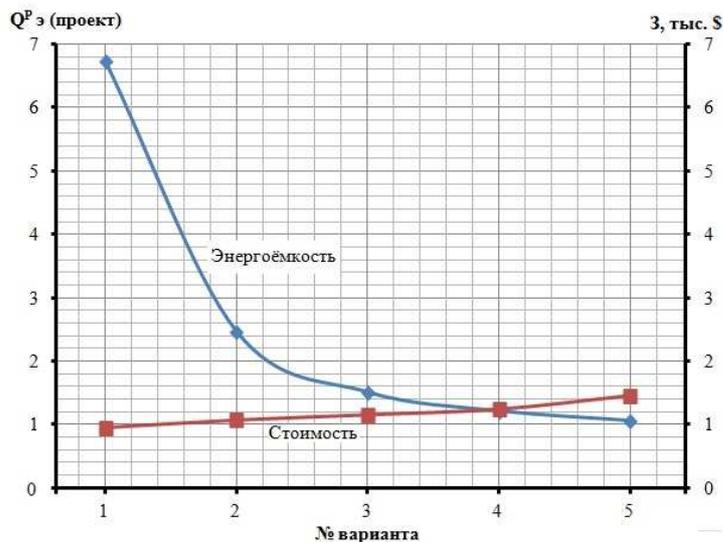


Рис. 6. Графики зависимости относительной энергоёмкости по данным проекта $Q_{э}^P$ и общих капитальных затрат при различных вариантах

Анализ приведенных на рис. 6 данных позволяет сделать вывод о том, что после значения $D = 0,03$ м (вариант № 4) дальнейшее увеличение диаметра не позволяет добиться значительного снижения относительной энергоёмкости по данным проекта $Q_{э}^P$, однако увеличивает стоимость системы. Исходя из вышеизложенного, окончательным вариантом выбора оборудования становится вариант № 4 (табл. 1). На этапе 2 выбор диаметра трубопровода и мощности насоса был оптимизирован по показателю энергоэффективности и затратам. Отметим, что результатом второго этапа стало дальнейшее снижение потребляемой мощности на 82 % и снижение относительной энергоёмкости по данным проекта $Q_{э}^P$ до 1,215 от 6,740.

5. Сравнение характеристик систем

Параллельные сравнения характеристик систем при традиционном и интегральном проектировании (табл. 2) свидетельствуют о существенно различающихся результатах, к которым приводят каждый из этих подходов. Расходы в расчете на жизненный цикл системы, приведенные в книге [3], при интегральном подходе к проектированию в пять раз ниже, чем при традиционном. Достижение такого результата стало возможным благодаря десятикратному снижению энергоёмкости технологического процесса.

Таблица 2

Сравнение результатов проектирования для двух решений

Решение	D , м	P , Вт	Общие капитальные затраты, \$	Эксплуатационные расходы, \$/мес	Затраты в течение жизненного цикла –NPV, \$	Q_{Σ}^P (проект)
Традиционное проектирование	0,015	1 025	1 451	61	15 129	10,468
Интегральный подход	0,03	119	1 245	9	3 112	1,215

Заключение

Введенный дополнительный показатель энергетической эффективности – относительная (безразмерная) энергоемкость процесса по данным проекта Q_{Σ}^P (проект) позволил с помощью МКО объективно оценить энергетическую эффективность процесса на этапе проектирования, это обстоятельство открывает возможности вести поэлементный анализ системы, вырабатывать стратегию управления общим системным показателем – энергоемкостью продукции.

Для достижения наивысших показателей энергоэффективности технической системы предприятия необходимо осуществлять оптимизацию энергетических показателей на этапе ее создания и конструкторской проработки. Очевидно, что главным источником снижения эксплуатационных расходов в течение всего жизненного цикла системы является обеспечение наивысшей эффективности на стадии проектирования. Как показывает практический опыт, энергосберегающие мероприятия, реализуемые в процессе эксплуатации, оказывают меньшее влияние на энергоемкость продукции и являются высокочрезвычайными. Таким образом, повышение эффективности использования энергии в АПК предлагается начинать с анализа энергетической части проекта предприятия. Устранение несовершенного инжиниринга на начальном этом этапе позволяет реализовать значительный потенциал энергосбережения до эксплуатации, избежать затрат на устранение проектных ошибок.

Анализ приведенных проектных решений с помощью МКО наглядно продемонстрировал существенные преимущества интегрального подхода к проектированию перед традиционным, поэтому данный подход будет использован в дальнейших исследованиях, посвященных вопросам повышения эффективности использования энергии на предприятиях АПК. В итоге использование интегрального подхода к проектированию позволило снизить потребляемую расчетную мощность на 88 % и относительную энергоемкость Q_{Σ}^P (проект) с 10,468 до 1,215.

Предложенный в статье алгоритм позволяет использовать МКО для оценки рассмотренных в книге примеров проектных решений по показателю относительной энергоемкости Q_{Σ}^P (проект) и для выбора наиболее оптимального решения с точки зрения энергетической эффективности. Снижение расчетной мощности в рассматриваемом примере стало возможным благодаря включению двух дополнительных этапов в процесс проектирования и выбора вариантов реализации системы на основании показателя энергоэффективности.

Библиографический список

1. Новак А. В. Повышение энергоэффективности как инструмент модернизации экономики России // Энергоаудит и энергосервис. 2014. № 1 (29). С. 4–9.
2. Карпов В. Н., Юлдашев З. Ш., Панкратов П. С. Энергосбережение в потребительских энергетических системах. СПб. : СПбГАУ, 2012. 125 с.
3. Проектирование систем как единого целого. Интегральный подход к инжинирингу для устойчивого развития / П. Стасинопулос [и др.]. М. : Эксмо, 2012. С. 34–35.
4. Карпов В. Н., Юлдашев З. Ш. Энергосбережение. Метод конечных отношений : монография. СПб. : СПбГАУ, 2010. 146 с.
5. Концепция оценки топливно-энергетической эффективности производства в АПК / В. Н. Карпов [и др.] // Известия международной академии аграрного образования. 2014. № 20. С. 35–41.
6. Юлдашев З. Ш., Немцев А. А., Немцев И. А. Определение энергоемкости результата технологического процесса // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 8 (Ч. 3). С. 421–422.

References

1. Novak A. V. Povyshenie energoeffektivnosti kak instrument modernizatsii ekonomiki Rossii [Improving energy efficiency as an instrument of economic modernization in Russia] // Energoaudit i energoservis. 2014. N 1 (29). P. 4–9.
2. Karpov V. N., Yuldashev Z. Sh., Pankratov P. S. Energoberezhenie v potrebitelskih energeticheskikh sistemah [Energy efficiency in consumer power systems]. SPb. : SPbGAU, 2012. 125 p.

3. Proektirovanie sistem kak edinogo tselogo. Integralnyi podhod k inzhiniringu dlya ustoychivogo razvitiya [Designing systems as a whole. Integrated approach to engineering for sustainable development] / P. Stasinopoulos [i dr.]. M. : Eksmo, 2012. P. 34–35.

4. Karpov V. N., Yuldashev Z. Sh. Energoberezhenie. Metod konechnykh otnosheniy [Energy saving. The method of finite relations] : monografiya. SPb. : SPbGAU, 2010. 146 p.

5. Kontseptsiya otsenki toplivno-energeticheskoy effektivnosti proizvodstva v APK [The concept of assessment fuel and power efficiency production in the agrarian and industrial complex] / V. N. Karpov [i dr.] // Izvestiya mezhdunarodnoy akademii agrarnogo obrazovaniya. 2014. N 20. P. 35–41.

6. Yuldashev Z. Sh., Nemtsev A. A., Nemtsev I. A. Opredelenie energoemkosti rezultata tehnologicheskogo protsessa [Determination of energy consumption of the technological process] // Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimentalnogo obrazovaniya. 2015. N 8 (Ch. 3). P. 421–422.

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 Артем Алексеевич – ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный аграрный университет", кафедра энергообеспечения производств и электротехнологии, аспирант; e-mail: artem_nemcev@mail.ru

Nemtsev A. A. – Saint-Petersburg State Agrarian University, Department of Power Supply Facilities and Electrotechnology, Ph.D. Student; e-mail: artem_nemcev@mail.ru