УДК 621.65:620.9

Хайдаров Хумоюн Мухтор угли

доцент

Андижанский государственный технический институт

Республика Узбекистан, г. Андижан

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОГО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПОТРЕБЛЕНИЯ И НАПОРА

Аннотация. *В статье рассматривается методика определения удельного энергопотребления насосной установки с использованием фактически измеренных параметров электропотребления, подачи и напора. Обоснована необходимость совместного учета объема перекачиваемой жидкости и полного напора, поскольку сравнение только по потребленной электроэнергии не позволяет корректно оценить энергетическую эффективность при различных режимах работы. Предложен алгоритм измерений, расчета удельного энергопотребления и оценки общей эффективности установки. Приведен иллюстративный расчетный пример; числовые данные не являются результатами натурного эксперимента. Методика может применяться для энергетического обследования, оперативного мониторинга и сравнения режимов работы насосных агрегатов.*

Ключевые слова: *насосная установка, удельное энергопотребление, напор, расход, электрическая энергия, гидравлическая мощность, энергетическая эффективность.*

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION OF A PUMPING UNIT BASED ON MEASURED CONSUMPTION AND HEAD

Khaydarov Khumoyun Mukhtor ugli
Associate Professor Andijan State Technical Institute
Republic of Uzbekistan, Andijan

Abstract. *The article presents a methodology for determining the specific energy consumption of a pumping unit using measured electricity consumption, flow rate and head. It explains why the pumped volume and total head should be considered together: electricity consumption alone cannot provide a fair comparison of operating modes with different hydraulic duties. A step-by-step procedure for measurements, calculation of specific energy consumption and estimation of overall efficiency is proposed. An illustrative calculation is included to demonstrate the method; its numerical values are not field-experiment results. The methodology can be used for energy audits, operational monitoring and comparison of pumping-unit operating conditions.*

Keywords: *pumping unit, specific energy consumption, head, flow rate, electrical energy, hydraulic power, energy efficiency.*

Введение

Насосные установки относятся к числу значимых потребителей электроэнергии в системах водоснабжения, орошения, коммунального хозяйства и промышленного производства. Их фактическая энергоэффективность зависит не только от паспортного КПД насоса и электродвигателя, но и от характеристик трубопроводной сети, требуемого напора, фактической подачи, технического состояния оборудования и режима регулирования. Поэтому оценивать работу агрегата исключительно по месячному или суточному счету электроэнергии недостаточно: высокое потребление может быть связано как с низкой эффективностью, так и с увеличением объема перекачки или требуемого напора.

Практическим показателем энергетического анализа является удельное энергопотребление — количество электрической энергии, затрачиваемой на перекачивание единицы объема жидкости при заданном напоре. В руководстве ACWUA удельный расход энергии на единицу объема и напора рассматривается как показатель для сравнения насосных станций и выявления отклонений [1]. Руководство Министерства энергетики США указывает, что при оценке насосных систем необходимо использовать полевые измерения расхода, напора и мощности двигателя [2].

Актуальность темы обусловлена тем, что данные об энергопотреблении часто доступны со счетчика, тогда как расход и напор фиксируются нерегулярно либо принимаются по паспортным значениям. Цель работы — разработать практическую методику определения удельного энергопотребления насосной установки по измеренным значениям электрической энергии, подачи и напора. Для достижения цели необходимо определить состав измеряемых параметров, сформировать расчетные зависимости, описать порядок проведения измерений и указать основные источники погрешности.

Материалы и методы исследования

1. Показатели энергетической эффективности насосной установки

Для корректного анализа необходимо различать удельное энергопотребление на единицу объема и показатель с учетом напора. Первый отражает затраты электрической энергии на перекачивание одного кубического метра жидкости, но при сравнении объектов с разным напором дает неполную картину. Второй учитывает одновременно объем перекачки и гидравлическую работу, необходимую для преодоления напора.

Пусть E — электрическая энергия, потребленная за интервал измерения, кВт·ч; V — объем жидкости, м³; Q — средний расход, м³/ч; t — длительность

измерения, ч; H — полный напор, м. При постоянном расходе $V = Q \cdot t$. При изменении расхода объем предпочтительно получать по интегрированным показаниям расходомера или счетчика объема.

Удельное энергопотребление на единицу объема рассчитывается по формуле: $e_v = E/V = E/(Q \cdot t)$, кВт·ч/м³. Показатель с учетом напора определяется как $e_h = E/(V \cdot H) = E/(Q \cdot t \cdot H)$, кВт·ч/(м³·м). Для удобства малые значения можно выражать в Вт·ч/(м³·м), умножая результат в кВт·ч/(м³·м) на 1000. Все параметры должны относиться к одному и тому же режиму и временному интервалу.

Полный напор определяется как разность полных удельных энергий жидкости на выходе и входе насоса. Для двух измерительных сечений: $H = (p_2 - p_1)/(\rho g) + (v_2^2 - v_1^2)/(2g) + (z_2 - z_1)$, где p_1 и p_2 — давления, Па; ρ — плотность жидкости, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; v_1 и v_2 — средние скорости, м/с; z_1 и z_2 — высотные отметки, м. Если диаметры трубопроводов различаются, разность скоростных напоров нельзя автоматически считать нулевой.

Гидравлическая мощность, передаваемая жидкости, равна $P_h = \rho g Q_s H$, Вт, где Q_s — расход в м³/с. Если Q задан в м³/ч, то $P_h = \rho g (Q/3600) H$. Для воды плотностью около 1000 кг/м³ теоретическая энергия на подъем 1 м³ на 1 м составляет приблизительно 2,725 Вт·ч. Это нижняя граница без учета потерь в насосе, двигателе и трубопроводной сети.

Общая эффективность насосно-двигательного агрегата оценивается отношением гидравлической мощности к потребляемой активной электрической мощности: $\eta_{общ} = P_h/P_{эл} \times 100\%$. В трехфазной системе нельзя во всех случаях заменять измерение активной мощности простым произведением $\sqrt{3} \cdot U \cdot I$: необходимо учитывать коэффициент мощности и

возможную несимметрию. При возможности следует применять анализатор мощности.

2. Состав измерений и требования к приборам

Минимальный набор данных включает электрическую энергию E, объем V либо расход Q и время t, а также полный напор H. Для поиска причин низкой эффективности полезно дополнительно измерять напряжение, ток, активную мощность, частоту вращения, температуру жидкости и состояние регулирующей арматуры. Если насосов несколько, данные регистрируют по каждому агрегату либо обеспечивают однозначное распределение общей энергии и общего объема.

Электрическую энергию регистрируют счетчиком известного класса точности или анализатором качества электроэнергии. Расход измеряют поверенным расходомером. При его отсутствии допускается метод объемного накопления, если установка позволяет надежно определить объем за известное время. Напор определяют по давлениям на всасывании и нагнетании, отметкам точек измерения и, при необходимости, скоростным составляющим. Необходимо учитывать диапазон приборов, положение нуля, импульсные колебания и наличие воздуха в импульсных линиях.

Измерения рекомендуется проводить в установившемся режиме. После пуска дожидаются стабилизации расхода, давления и мощности, затем синхронно регистрируют данные в течение заранее установленного периода. При переменной нагрузке выполняют серию измерений в нескольких характерных режимах. Каждый режим описывают вместе с положением задвижки, частотой преобразователя, числом работающих насосов и уровнем воды в источнике.

Стандарт ISO 9906 описывает испытания гидравлических характеристик центробежных, диагональных и осевых насосов, включая измерение расхода,

напора, мощности и КПД [3]. Для эксплуатационного энергетического обследования не всегда требуется полный приемочный тест, однако принципы корректного измерения и сопоставления условий остаются актуальными.

3. Последовательность расчета

Этап 1 — определение границ объекта. Устанавливают, оценивается ли отдельный насос с двигателем, насосная группа или станция в целом. В границы учета включают только те потребители и потоки, для которых можно согласованно измерить энергию и объем.

Этап 2 — выбор интервала. Период наблюдения должен охватывать устойчивый режим, а начало и окончание учета электрической энергии и расхода должны совпадать.

Этап 3 — измерение энергии. Фиксируют начальное и конечное показания счетчика; разность дает E. Если анализатор регистрирует мощность Рэл во времени, энергию получают интегрированием Рэл(t) по интервалу.

Этап 4 — определение объема. При наличии счетчика объема V находят по разности показаний. При постоянном расходе используют $V = Q \cdot t$. Если Q меняется, применяют суммирование по интервалам: $V = \Sigma Q_i \Delta t_i$.

Этап 5 — определение напора. Измеряют давление на всасывании и нагнетании, фиксируют отметки и диаметры труб. Рассчитывают H с учетом давления, скорости и высоты. Если используется датчик дифференциального давления, проверяют, соответствует ли его показание полному напору.

Этап 6 — расчет показателей. Определяют $e_v = E/V$ и $e_h = E/(V \cdot H)$. Для воды дополнительно рассчитывают гидравлическую мощность и общую эффективность. Результаты сопровождают единицами измерения и временным интервалом.

Этап 7 — проверка и интерпретация. Сопоставляют значения между режимами, сменами или агрегатами. Рост e_h при сопоставимых условиях может

указывать на засорение фильтров, износ рабочего колеса, дросселирование, утечки, изменение сопротивления сети или снижение эффективности двигателя. Причину следует подтверждать дополнительными измерениями.

Результаты исследования

4. Расчетная схема и иллюстративный пример

Для демонстрации порядка расчета рассмотрим условный пример. Приведенные значения иллюстративны и не являются результатами натурного эксперимента. Пусть за период t = 2 ч счетчик зарегистрировал E = 18 кВт·ч, средний расход составил Q = 30 м³/ч, а измеренный полный напор — H = 20 м.

Объем перекаченной воды: $V = Q \cdot t = 30 \cdot 2 = 60$ м³. Удельное энергопотребление на единицу объема: $e_v = E/V = 18/60 = 0{,}30$ кВт·ч/м³.

Удельное энергопотребление с учетом напора: $e_h = E/(V \cdot H) = 18/(60 \cdot 20) = 0{,}015$ кВт·ч/(м³·м) = 15 Вт·ч/(м³·м).

Для воды теоретическая энергия на единицу объема и напора составляет около 2,725 Вт·ч/(м³·м). Приближенная оценка общей эффективности в условном примере: $\eta_{общ} \approx 2{,}725/15 \times 100\% = 18{,}2\%$. Такое значение требует проверки границ учета, точности измерений, фактического напора и расхода, а также режима работы оборудования. Низкая оценка может быть обусловлена не только насосом, но и электродвигателем, арматурой, трубопроводом, утечками или ошибками измерения.

Для практического анализа рекомендуется вести таблицу по каждому режиму: дата и время, E, V, Q, H, e_v, e_h, Рэл, P_h и $\eta_{общ}$. Если измерения выполняются по коротким интервалам, итоговый показатель за смену следует рассчитывать как отношение суммарной энергии к суммарному объему и соответствующей гидравлической работе, а не как простое среднее удельных показателей.

При переменном напоре формула E/(V·Hср) может давать смещение, если средний напор определен арифметически и расход меняется одновременно. Более корректно рассчитывать по интервалам: $E\Sigma = \Sigma E_i$, $V\Sigma = \Sigma V_i$, а гидравлическая работа пропорциональна $\Sigma(V_i H_i)$. Тогда $e_h = E\Sigma/\Sigma(V_i H_i)$. Такой подход лучше отражает режим с переменными подачей и напором.

5. Анализ погрешностей и достоверности

Основные источники погрешности — класс точности счетчика, расходомера и датчиков давления; несинхронность показаний; пульсации потока; неправильный выбор мест установки датчиков; наличие воздуха; изменение уровня в резервуаре; ошибочное определение границ системы. Нельзя использовать паспортную подачу вместо фактически измеренного расхода, поскольку насос не всегда работает в паспортной рабочей точке.

Если относительные неопределенности энергии, объема и напора обозначить δE, δV и δH, то при независимых малых погрешностях относительная неопределенность e_h приближенно оценивается как $\delta e_h \approx \sqrt{(\delta E^2 + \delta V^2 + \delta H^2)}$. Например, при неопределенностях энергии 1%, объема 2% и напора 2% результирующая неопределенность составит около 3%. Это приближенная оценка; систематические смещения следует рассматривать отдельно.

Для повышения повторяемости проводят измерения в одинаковых точках, фиксируют единицы и диапазоны приборов, повторяют измерение в нескольких циклах, сохраняют исходные показания и исключают пусковые переходные процессы, если исследуется установившийся режим. Если станция работает циклически, измерительный период должен охватывать полный рабочий цикл.

Сопоставлять результаты корректно только при близких условиях: типе жидкости, напоре, диапазоне подачи, конфигурации трубопровода и границах

учета. Показатель e_v удобен для мониторинга одной станции, а e_h — для сравнения режимов с разным напором. Для технической диагностики оба показателя рассматривают вместе с КПД и характеристиками оборудования.

Обсуждение

Предложенная методика связывает измеренную электрическую энергию с полезной гидравлической работой и позволяет перейти от абсолютного потребления к сопоставимому энергетическому показателю. В отличие от оценки только по мощности двигателя или паспортному КПД, методика отражает реальные условия эксплуатации, включая изменение расхода и напора. Такой подход соответствует практике энергетической оценки насосных систем, где полевые данные о расходе, напоре и мощности используются для выявления потенциала энергосбережения [2].

Практическая ценность e_h состоит в том, что он позволяет обнаруживать изменения, неочевидные по общему счету электроэнергии. Например, после очистки фильтра потребление за час может остаться почти неизменным, но при увеличении подачи возрастет объем перекачки, а удельное энергопотребление снизится. И наоборот, уменьшение показаний счетчика не всегда означает повышение эффективности: оно может быть связано с уменьшением подаваемого объема или напора.

По результатам мониторинга можно определить направления дальнейшего обследования: проверку рабочей точки насоса, снижение необоснованного дросселирования, подбор рабочего колеса, регулирование частоты вращения, устранение утечек, очистку фильтров и трубопроводов, а также проверку электродвигателя. Частотное регулирование не является универсальным решением: экономический эффект зависит от характеристики системы, диапазона подачи, КПД преобразователя и режима работы. Любые изменения следует подтверждать повторными измерениями.

Ограничение методики состоит в необходимости измерять не только электрическую энергию и напор, но и фактический объем жидкости. Без V либо Q и времени невозможно получить удельное энергопотребление в корректных физических единицах. Если доступны только данные о потреблении и напоре, результат можно рассматривать как промежуточный показатель, но не как полноценный удельный расход энергии на единицу перекачанной воды.

Заключение

Разработана последовательность определения удельного энергопотребления насосной установки по данным фактических измерений. Показано, что для корректного расчета необходимы согласованные значения электрической энергии, объема перекаченной жидкости и полного напора. В качестве основных показателей предложены $e_v = E/V$ и $e_h = E/(V \cdot H)$, позволяющие оценивать затраты энергии как на единицу объема, так и на единицу гидравлической работы.

Определены требования к измерениям: синхронизация интервалов учета, использование фактической подачи, корректный расчет полного напора и фиксация границ обследуемой системы. Для переменных режимов рекомендован расчет по коротким интервалам с последующим суммированием энергии, объема и гидравлической работы. Рассмотрен способ приближенной оценки общей эффективности по отношению гидравлической и электрической мощности.

Методика может применяться при энергетическом обследовании насосных станций, сравнении режимов эксплуатации и контроле эффекта от внедрения энергосберегающих мероприятий. Практическая проверка должна включать натурные измерения на конкретной установке, оценку неопределенности приборов и сравнение результатов до и после изменения

режима. Приведенный числовой пример носит иллюстративный характер и не заменяет экспериментальных данных.

Использованные источники

1. Arab Countries Water Utilities Association (ACWUA). Energy Efficiency in Water and Wastewater Utilities: A Practical Guide. 2015. Электронный ресурс. URL: https://www.pseau.org/outils/ouvrages/acwua_energy_efficiency_in_water_and_wastewater_utilities_2015.pdf (дата обращения: 28.10.2026).

2. U.S. Department of Energy. Improving Pumping System Performance: A Sourcebook for Industry. 2nd ed. Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2006. Электронный ресурс. URL: https://www.energy.gov/sites/default/files/2014/05/f16/pump.pdf (дата обращения: 28.10.2026).

3. ISO 9906:2012. Rotodynamic pumps — Hydraulic performance acceptance tests — Grades 1, 2 and 3. Geneva: International Organization for Standardization, 2012. Электронный ресурс. URL: https://www.iso.org/standard/41202.html (дата обращения: 28.10.2026).

4. ISO 17769-1:2012. Liquid pumps and installation — General terms, definitions, quantities, letter symbols and units — Part 1: Liquid pumps. Geneva: ISO, 2012.

5. ISO 17769-2:2012. Liquid pumps and installation — General terms, definitions, quantities, letter symbols and units — Part 2: Pumping system. Geneva: ISO, 2012.

6. European Commission. Commission Regulation (EU) No 547/2012 implementing Directive 2009/125/EC with regard to ecodesign requirements for water pumps. Official Journal of the European Union, 2012. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2012/547/oj (дата обращения: 28.10.2026).