

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО И ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО КПД (на примере трубопроводного транспорта)**

*Описана общая постановка задачи оценки энергетической эффективности разных видов транспорта и общий методический подход к ее решению. Разработана методика на примере трубопроводного транспорта нефти. Вводится понятие идеализированного аналога процесса транспортировки нефти, описаны допущения, принятые при их разработке.*

**Ключевые слова:** энергетическая эффективность, трубопроводный транспорт, энергетический и эксергетический КПД, транспорт нефти

Транспорт всех видов является чрезвычайно энергоемкой сферой экономики. Как и практически во всех энергопотребляющих отраслях, эффективность энергоиспользования в этой сфере в настоящее время определяется путем сопоставления с лучшими в стране и за рубежом удельными расходами энергии на тыс. т-км перевозимого груза или на 1 млн. м<sup>3</sup> перекачиваемых нефти и газа. Недостатки этого способа оценки подробно рассмотрены нами в предыдущих работах [1,2].

Однако как и в других отраслях для оценки эффективности на транспорте можно разработать методы, базирующиеся на фундаментальных термодинамических принципах. Например, для этой цели могут быть использованы идеальные (идеализированные) аналоги исследуемых процессов.

В инженерной практике уже давно и достаточно широко пользуются понятием идеализированного аналога для оценки энергетического совершенства процессов и машин, чтобы получить ясное представление о том, насколько они могут быть улучшены и каков предел снижения затрачиваемой в них энергии. При этом в зависимости от характера решаемых задач используется аналог с разной степенью идеализации. Например, в теплоэнергетике помимо цикла Карно, опреде-

ляемого только температурами горячего и холодного источников теплоты (предельная степень идеализации), применяются циклы Ренкина, Отто, Дизеля и др., которые учитывают вид и физические свойства используемого рабочего тела (идеализированные аналоги).

Сопоставление энергетических показателей реального объекта с соответствующими показателями его аналога дает основание судить о достигнутом совершенстве и эффективности использования затраченной в нем энергии/работы. Наиболее известным и распространенным показателем энергоэффективности процессов, установок, технических систем является коэффициент полезного действия (КПД), который представляет собой отношение полезной (целевой) энергии  $I_{пол}$  к затраченной на ее получение  $I_{затр}$ :

$$\eta_{эн} = I_{пол} / I_{затр} \quad (1)$$

При пользовании этим показателем необходимо принимать во внимание следующие обстоятельства. Строго говоря,  $\eta_{эн}$ , который рассчитывается лишь на основе первого начала термодинамики, пригоден для оценки совершенства технических систем, к которым подводится и в которых получается в виде целевого продукта только энергия, не характери-

\* - автор, с которым следует вести переписку.

зубая энтропией. С введением понятия эксергии появилась возможность оценивать энергоэффективность объектов не только величиной энергетического КПД, определяемого по выражению (1), но также величиной эксергетического КПД, равного

$$\eta_{\text{экс}} = E_{\text{пол}} / E_{\text{затр}} \quad (2)$$

Значения  $\eta_{\text{эн}}$  и  $\eta_{\text{экс}}$  могут быть установлены лишь для технических объектов, целевым назначением которых является получение продукта, выражаемого в энергетических единицах. Поэтому оценить энергоэффективность большинства технологических процессов и установок с помощью показателей, определяемых по выражениям (1) и (2), нельзя. В то же время идея использовать такой удобный и информативный показатель как КПД для оценки термодинамической эффективности любых процессов является привлекательной. С этой целью было предложено  $I_{\text{пол}}$  и  $E_{\text{пол}}$  в выражениях (1) и (2) заменить значениями минимально необходимых затрат соответственно энергии и эксергии -  $I_{\text{мин}}, E_{\text{мин}}$ . Численные значения этих величин могут устанавливаться на основе расчета полного энергетического баланса идеализированного аналога исследуемого процесса или установки. КПД объекта, рассчитанный по выражениям

$$\eta_{\text{эн}} = I_{\text{мин}} / I_{\text{затр}} \quad (3)$$

и

$$\eta_{\text{экс}} = E_{\text{мин}} / E_{\text{затр}} \quad (4)$$

по своей сути является показателем сравнительной эффективности, который в теплоэнергетике носит название относительного КПД.

Оценка энергоэффективности по выражениям (3) и (4) возможна абсолютно для любых технических объектов. Задача состоит лишь в разработке для каждого из них идеализированного аналога и оп-

ределении на его основе требуемых для его функционирования затрат энергии и эксергии.

Для внедрения предложенной методики в инженерную практику необходимо узаконить понятие эксергии и два показателя энергетической эффективности – энергетический и эксергетический КПД. Кроме того, реализация этой на первый взгляд простой методики для огромного числа разнотипных по характеру и назначению технологических процессов сопряжена с большим объемом работ, в том числе связанных с разработкой государственных стандартов на идеализированные аналоги процессов разного типа. Без этапа стандартизации идеализированного аналога однозначно определить минимально необходимые затраты для исследуемого процесса невозможно из-за бесконечно большого числа вариантов его идеализированных описаний, из которых должен быть выбран и узаконен один.

Очевидно, что термодинамический анализ любого объекта должен осуществляться на единых методических принципах, однако при исследовании конкретных технических систем нельзя не учитывать специфические особенности их устройства и функционирования. В частности, при решении задачи оценки эффективности использования энергии в системах транспорта, при определении минимально необходимых затрат энергии на транспортные услуги необходимо принять во внимание следующие обстоятельства.

1. Многообразие видов транспорта (железнодорожный, воздушный, водный, автомобильный, трубопроводный).

2. Разнообразие транспортных средств:

- в железнодорожном транспорте: тепловоз, электровоз;

- в водном транспорте: пароход, дизельные суда, атомоходы, суда на подводных крыльях, воздушных подушках;

- в авиационном (воздушном) транспорте: винтовые самолеты и вертолеты, реактивные и турбореактивные воздуш-

ные средства, дирижабли, воздушные шары;

- в автомобильном транспорте: бензиновые, дизельные, турбо- и электромобили.

3. Виды перевозок:

- пассажирские (перемещение людей);  
- грузовые (транспортировка грузов).

4. Направления перемещений транспортных средств в пространстве:

- вертикальные;  
- горизонтальные;  
- смешанные.

Предельная идеализация процессов перемещения тел в пространстве, очевидно, является неконструктивной, поскольку может привести к выводу о нулевых затратах энергии на их реализацию.

Идеализированный аналог целесообразно подбирать для каждого вида транспорта, но не для каждого транспортного средства. При разработке идеализированного аналога главная задача состоит в выборе обоснованной величины сил сопротивления движущемуся в той или иной среде телу. Величина этих сил определяется физическими свойствами среды, в которой перемещается транспортное средство. Кроме того, она зависит от конструктивно-технологических решений, реализованных при его создании, а также от скорости его перемещения. Последняя зависимость очень важна (скорость перемещения транспортных средств характеризует уровень развития страны, уровень предлагаемого сервиса), ее желательно установить, чтобы иметь возможность рассчитать минимальные затраты энергии на транспорт для разных скоростей.

Общие принципы и допущения, принимаемые нами во внимание при формировании идеализированного процесса перемещения тела (транспортного средства), состоят в следующем.

1. Движение транспортного средства в различных средах предполагается прямолинейным равномерным с постоянной скоростью.

2. Затраты энергии/работы, связанные с перемещением самого транспортного средства, полагаем необходимыми, т.е. псевдополезными.

3. При перемещении в трубах, каналах жидкостей и газов (трубопроводный транспорт) их химическая энергия/ эксергия не принимается во внимание, поскольку их величина остается постоянной.

4. В идеализированном трубопроводе утечки транспортируемой жидкости (газа) отсутствуют.

5. Идеализированный трубопровод для жидкостей и газов представляет собой прямолинейную горизонтальную трубу (канал) одного и того же сечения.

Покажем использование разработанных методов на примере транспорта жидкости. Затраты энергии на трубопроводный транспорт различных жидкостей составляют значительную величину и имеют тенденцию к возрастанию. Поэтому повышение энергетической эффективности трубопроводного транспорта является чрезвычайно актуальной задачей. Анализ публикаций, посвященных рассмотрению тех или иных аспектов этой проблемы в отечественной и зарубежной литературе, показал, что в настоящее время нет единого общепринятого показателя энергоэффективности для этого вида транспорта, методики его определения.

Задача проводимого исследования – показать, что для трубопроводных систем пригодна изложенная выше методология оценки энергетической эффективности. Для решения этой задачи, как было отмечено выше, необходимо сформировать идеализированный аналог процесса и определить затраты энергии, необходимой для его реализации.

По своему назначению любой трубопровод, как правило, не производит никакой энергии, это не его задача. Он сооружается с целью перемещения жидкостей от места их добычи (производства) к месту потребления, т.е. относится к классу технических систем, КПД которых должен определяться по выражениям (3) и

(4) как соотношение затрат энергии/работы на перемещение заданного объема (массы) продукта на определенное расстояние в идеализированном и реальном трубопроводах.

Задачей разработчика идеализированного аналога любых процессов (объектов) состоит в том, чтобы получить некоторое упрощенное описание реального процесса, условий его осуществления. Причем желательно, чтобы эти условия были максимально приближены к реальным, но в то же время были заведомо нереализуемы на практике.

Общая теория процессов, происходящих в трубопроводах при транспортировке по ним жидкостей и газов, подробно описана в специальной литературе [3-6]. В данной случае речь идет лишь о том, как эти знания о реальных процессах можно использовать при формировании их идеализированных аналогов, при вычислении теоретических затрат энергии на реализацию последних.

Переходя к процедуре формирования идеализированного аналога трубопроводного транспорта несжимаемой жидкости, прежде назовем предпосылки, которые были заложены при этом.

1. Минимальные затраты энергии на транспорт жидкости не зависят от типа и числа насосных станций, вида и характеристик установленного на них оборудования, а определяются лишь физическими свойствами материала трубопровода и прокачиваемых по нему продуктов.

2. Течение жидкости предполагается прямолинейным, равномерным с постоянной скоростью; характер течения турбулентный.

3. Трубопровод – горизонтальная труба заданной длины, без поворотов и искривлений траектории, а также других источников местных сопротивлений; утечек прокачиваемых материалов не имеет.

4. Расходы энергии/работы, связанные с обслуживанием трубопровода, в значении минимальных затрат на транспорт не включаются.

При принятых допущениях к описанию идеализированного аналога трубопровода минимальные затраты энергии/работы на транспорт жидкости по трубе складываются из двух составляющих: механической работы, которую нужно затратить, чтобы ввести тело объемом  $V$  во внешнюю среду с давлением  $p_0 - A_{\text{мех}}^*$ , и работы, связанной с преодолением сил трения, возникающих при перемещении жидкости в трубе  $A_{\text{тр}}^*$ , т.е.

$$A_{\text{min}}^{\text{т}} = A_{\text{тр}}^* + A_{\text{мех}}^* .$$

Механическая работа определяется по выражению

$$A_{\text{мех}} = p_0 V = p_0 \cdot \frac{m}{\rho} ,$$

где  $m$  – масса перемещаемой жидкости, кг;  $\rho$  – ее плотность, кг/м<sup>3</sup>.

Вторая составляющая затрат может быть рассчитана по известному в гидравлике выражению, Дж

$$A_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\omega^2}{2} \cdot m , \quad (5)$$

где  $\omega$  – средняя скорость течения жидкости, м/с;  $\lambda$  – безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления;  $l$  и  $d$  – соответственно длина и диаметр трубопровода, м.

Как видно из формулы (5), однозначно определить значение минимальной работы, затрачиваемой на преодоление сил гидравлического сопротивления непросто, поскольку она является функцией многих переменных, зависящих друг от друга.

В общем случае  $\lambda = \lambda_{\text{тр}} + \lambda_{\text{уск}}$ , но в силу принятого нами допущения о равномерном течении жидкости (пункт 2)  $\lambda_{\text{уск}} = 0$ . Коэффициент трения зависит от большого числа факторов:

$$\lambda_{\text{тр}} = f(v, p, t, k_3, \omega, d) ,$$

где  $\nu$  - кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;  $p$  - давление, Па;  $t$  - температура, °С;  $k_3$  - абсолютная эквивалентная шероховатость трубопровода, м.

Однако теория подобия позволяет привести эту зависимость к ряду более простых зависимостей, используемых при проведении практических расчетов.

Турбулентное течение жидкостей в большей мере соответствует характеру течений в реальных трубопроводах. Этот тип течений, а также зависимости, полученные для него, мы будем использовать и применительно к идеализированному трубопроводу.

При турбулентном течении для определения коэффициента трения воспользуемся известной формулой А.Д.Альтшуля:

$$\lambda_{\text{тр}} = 0,11 \left( \frac{k_3}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}. \quad (6)$$

Ее можно представить в виде

$$\lambda_{\text{тр}} = 0,11 \left( \frac{k_3}{d} + \frac{53,4 \cdot \nu \cdot d}{Q} \right)^{0,25}, \quad (7)$$

где  $Q$  - объемный расход жидкости, м<sup>3</sup>/с.

При заданных значениях  $k_3$ ,  $\nu$  и  $Q$  для определения оптимального диаметра трубы, соответствующего минимальным потерям на трение, возьмем производную выражения (7) и приравняем ее нулю:

$$\frac{d\lambda}{dd} = \frac{0,11}{4 \left( \frac{k_3}{d} + \frac{53,4 \cdot \nu \cdot d}{Q} \right)^{3/4}} \cdot \left( + \frac{53,4 \cdot \nu}{Q} - \frac{k_3}{d^2} \right) = 0.$$

Откуда получим

$$d_* = 0,137 \sqrt{\frac{k_3 Q}{\nu}}. \quad (8)$$

Гидравлически наивыгоднейшая скорость течения будет равна

$$\omega_* = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_*^2} \cong 68 \cdot \frac{\nu}{k_3}. \quad (9)$$

Если значения  $d$ , взятые из выражения (8), подставить в (7), то получим минимальное значение коэффициента гидравлического трения

$$\lambda_{\text{тр}}^* = 0,215 \left( \frac{k_3 \cdot \nu}{Q} \right)^{1/8}. \quad (10)$$

По выражению (6) с использованием зависимостей (8), (9) и (10) можно найти значения минимальной работы, необходимой для перемещения жидкости по трубопроводу с оптимальной для заданных значений вязкости и шероховатости скоростью. Характер зависимостей минимальной работы на транспорт нефти с оптимальной скоростью по трубопроводам разного диаметра приведены на рис. 1. Зависимости показывают, что при изменении вязкости жидкости вдвое величина минимальных затрат работы на ее перемещение возрастает почти в 5 раз. Минимальная работа трения существенно зависит также от шероховатости стенок трубы. Отсюда следует, что минимальные затраты работы на транспорт в любом случае не могут быть заданы в виде константы, и это обстоятельство необходимо учитывать при разработке соответствующего стандарта.

Вместе с тем изложенный методический подход позволяет оценивать энергоэффективность трубопроводного транспорта нефти. Алгоритм решения подобных задач покажем на конкретном примере.

Необходимо определить энергетическую эффективность работы нефтепровода, перекачивающего 1 т нефти плотностью  $\rho = 850 \text{ кг/м}^3$  и кинематической вязкостью  $\nu = 9,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  по трубе диаметром  $d = 0,3 \text{ м}$ , эквивалентная шероховатость стенок которой  $k_3 = 0,0005 \text{ м}$ . Протяженность трубопровода  $l = 1000 \text{ км}$ ,

средний удельный расход электроэнергии на перекачку нефти составляет 17 кВт·ч/тыс. т·км.

Как было сказано выше, минимальные затраты энергии/ эксергии на транспорт жидкости по трубе складываются из двух составляющих: работы, связанной с преодолением сил трения, возникающих в идеализированном трубопроводе при перемещении нефти с заданными характеристиками -  $A_{тр}$ , а также механической работы -  $A_{мех}$ , которую необходимо затратить, чтобы преодолеть давление внешней среды.

Первая составляющая может быть определена по выражению (5), в которое

должны быть подставлены оптимальные значения скорости течения

$$\omega_* = 68 \cdot \frac{v}{k_3} = 68 \cdot \frac{9,8 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 10^{-4}} = 1,333 \text{ м/с}$$

и коэффициента трения

$$\lambda_{тр}^* = 0,215 \left( \frac{k_3 \cdot v}{Q} \right)^{1/8} = 0,215 \left( \frac{5 \cdot 10^{-4} \cdot 9,8 \cdot 10^{-6}}{0,2616} \right)^{1/8} = 0,02515$$

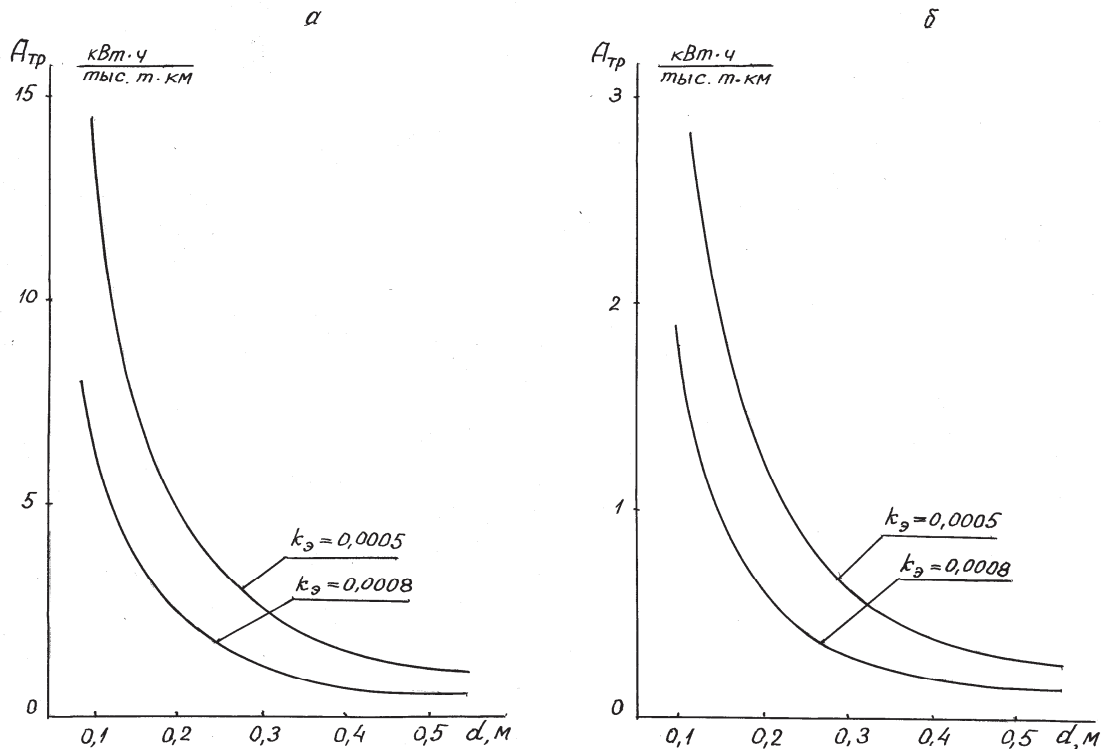


Рис. 1. Изменение минимальной работы трения в зависимости от диаметра и шероховатости труб при вязкости нефти: а)  $\nu = 9,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; б)  $\nu = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

где

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \omega_* = \frac{3,14 \cdot 0,3^2}{4} \cdot 1,333 = 0,0942 \text{ м}^3/\text{с}$$

Тогда получим

$$A_{\text{тр}}^* = \lambda_{\text{тр}}^* \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\omega_*^2}{2g} \cdot m = 0,02515 \cdot \frac{10^6}{0,3} \cdot \frac{1,333^2}{2 \cdot 9,81} =$$

$$= 9,806 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 2,724 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Вторая составляющая минимальных затрат энергии/работы на транспорт нефти равна –  $A_{\text{мех}} = p_0 \cdot \frac{m}{\rho_{20}} = 0,033 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$  В

сумме минимальные затраты энергии (работы) на транспорт нефти по трубопроводу с принятыми в примере параметрами составляют

$$A_{\text{min}}^{\text{T}} = A_{\text{тр}}^* + A_{\text{мех}}^* = 2,724 + 0,033 = 2,757 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Отсюда следует, что энергетический (эксергетический) КПД рассматриваемого нефтепровода составляет  $\eta_{\text{ЭН}} = 16,22\%$ .

Используя предложенный методический подход можно определить достигнутые значения энергетической эффективности

любого вида транспорта, что само по себе важно. Но кроме того, его можно широко использовать в целях оптимального управления режимами эксплуатации транспортных систем по критерию минимального расхода энергии, при реализации энергосберегающей политики в этой сфере.

#### Литература

1. Степанов В. С., Степанова Т. Б. Эффективность использования энергии. Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1994. 257 с.
2. Степанова Т. Б. Методика комплексного энергетического анализа технических систем // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2000. № 9-10 . С. 50-61.
3. Альтшуль А. Д. О коэффициенте полезного действия трубопровода // Изв. вузов. Энергетика. 1959. № 6. С.114-116.
4. Рихтер Г. Гидравлика трубопроводов. М.: Госэнергоиздат, 1933. 236 с.
5. Трубопроводный транспорт нефти и газа / под ред. . В.А. Юфина. М.: Недра, 1978. 407 с.
6. Киселев П. Г. Справочник по гидравлическим расчетам. М.-Л.: ГЭИ, 1957. 252 с.