

## УЧЕТ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ И НОРМИРОВАНИИ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА НЕФТИ

**А. С. ФИКОВ, С. В. БОРСУК**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### **Введение**

В Концепции Программы [1] социально-экономического развития Республики Беларусь на 2006–2010 гг. в числе важнейших проблем отмечается высокая энергоемкость выпускаемой продукции, что приводит к перерасходу ТЭР. Одним из инструментов государственной политики в области энергосбережения является нормирование расхода ТЭР на выпуск продукции. В целях регламентирования единых методических подходов к нормированию и прогнозированию расходов топливно-энергетических ресурсов на производство единицы продукции введено в действие положение о нормировании расхода топлива, тепловой и электрической энергии в народном хозяйстве Республики Беларусь [2]. Согласно этому документу, основной задачей нормирования расхода ТЭР является обеспечение применения при планировании производства продукции технически обоснованных норм расхода топлива, тепловой и электрической энергии (ЭЭ).

В настоящее время для предприятий трубопроводного транспорта нефти Республики Беларусь прогнозирование и нормирование потребления ЭЭ производится с использованием регрессионной модели зависимости электропотребления от технологических факторов [3]: грузооборота нефти, ее вязкости или температуры, эквивалентного диаметра нефтепровода:

$$W = \beta_p \cdot P + \beta_v \cdot \nu + \beta_d \cdot d_s + \beta_0, \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{сут}, \quad (1)$$

где  $\beta_p$  – коэффициент регрессии, кВт·ч/тыс. т·км;  $P$  – грузооборот нефти, тыс. т·км/сут;  $\beta_v$  – коэффициент регрессии, кВт·ч·с/(м<sup>2</sup>·сут);  $\nu$  – вязкость нефти, м<sup>2</sup>/с;  $\beta_d$  – коэффициент регрессии, кВт·ч/(м·сут);  $d_s$  – эквивалентный диаметр нефтепровода, м;  $\beta_0$  – свободный член уравнения регрессии, кВт·ч/сут.

Количество независимых переменных, включенных в модель, может варьироваться в зависимости от условий функционирования нефтепровода. Так, например, эквивалентный диаметр нефтепровода используется в модели только для прогнозирования и нормирования расхода ЭЭ в условиях проведения реконструкции линейной части нефтепровода.

### **Постановка задачи**

Для упрощения процедур нормирования и прогнозирования авторами [3] предложено сезонное отклонение электропотребления от среднегодового значения учитывать поправочным коэффициентом, что позволяет определять квартальный расход ЭЭ, используя минимальное количество независимых переменных. Данный коэффициент для  $i$ -го квартала находится по следующему выражению:

$$k_{vi} = W_{\text{кв.}i}^{\Phi} / W_{\text{кв.}i}^{\text{М}}, \text{ о. е.}, \quad (2)$$

где  $W_{\text{кв.}i}^{\Phi}$  – фактическое потребление ЭЭ за  $i$ -й квартал, кВт·ч;  $W_{\text{кв.}i}^{\text{М}}$  – расчетное электропотребление за  $i$ -й квартал, без учета сезонного изменения электропотребления (определяется по однофакторной модели зависимости электропотребления от грузооборота нефти), кВт·ч.

Для нормирования и прогнозирования ЭЭ в условиях стабильной динамики вязкости с учетом поправочного коэффициента модель имеет вид:

$$W = k_v \cdot (\beta_p \cdot P + \beta_0), \text{ кВт·ч/сут.} \quad (3)$$

Следует отметить, что при таком подходе определения поправочного коэффициента в прогнозное значение электропотребления закладывается влияние сезонного изменения вязкости нефти предыдущего года. Такой подход к нормированию и прогнозированию расхода ЭЭ дает хорошие результаты в условиях стабильной динамики вязкости нефти [3], поскольку в прогнозном периоде сохраняется величина сезонного изменения электропотребления, вызванного изменением вязкости нефти. Вязкость нефти, транспортируемой по территории Республики Беларусь, зависит от химического состава (месторождения) и ее температуры. Прогнозирование вязкости нефти в функции химического состава затруднительно, поскольку точно неизвестно из каких месторождений и в каких пропорциях будет поступать нефть на территорию республики в прогнозном периоде. В свою очередь температура нефти на территории Республики Беларусь формируется под воздействием температуры окружающей среды, которая, даже для таких значительных промежутков времени как квартал, не является постоянной величиной и на момент разработки норм не известна. Таким образом, нормирование и прогнозирование расхода ЭЭ ведется в условиях неопределенной исходной информации.

При разработке норм потребления ТЭР необходимо учитывать нормативные условия производства продукции и оказания услуг, регламентируемые техническими нормативными правовыми актами. К таким условиям, например, относятся: освещенность рабочего места, нормы расхода горячей воды на одного работника, температуры теплоносителя и окружающей среды. Применительно к технологическому процессу транспортировки нефти в качестве нормативных условий может быть принята температура окружающей среды (воздуха), регламентируемая [4]. Ставится задача разработать способ расчета нормативных поправочных коэффициентов сезонного отклонения электропотребления от среднего за год значения (НПК), исходя из среднеквартальных температур окружающей среды.

### **Предлагаемые способы решения**

Для решения поставленной задачи в регрессионной модели (1) вязкость нефти целесообразно заменить на температуру воздуха. Модель электропотребления участка нефтепровода для определения НПК в условиях отсутствия реконструкции нефтепровода примет вид:

$$W = \beta_p \cdot P + \beta_t \cdot t_{\text{о.с}} + \beta_0, \text{ кВт·ч/сут.}, \quad (4)$$

где  $\beta_p$  – коэффициент регрессии при грузообороте, кВт·ч/тыс.т·км;  $P$  – грузооборот нефти, тыс. т·км/сут;  $\beta_t$  – коэффициент регрессии при температуре воздуха, кВт·ч/сут·°С;  $t_{\text{о.с}}$  – температура воздуха, °С;  $\beta_0$  – свободный член уравнения регрессии, кВт·ч/сут.

Алгоритм построения модели аналогичен рассмотренному в [3], при периоде усреднения статистической информации 90 суток.

Замена в модели (1) вязкости нефти на температуру окружающей без изменения вида модели становится возможной вследствие линейности характера взаимозависимости параметров  $t_{o.c}$  и  $\nu$  (рис. 2).

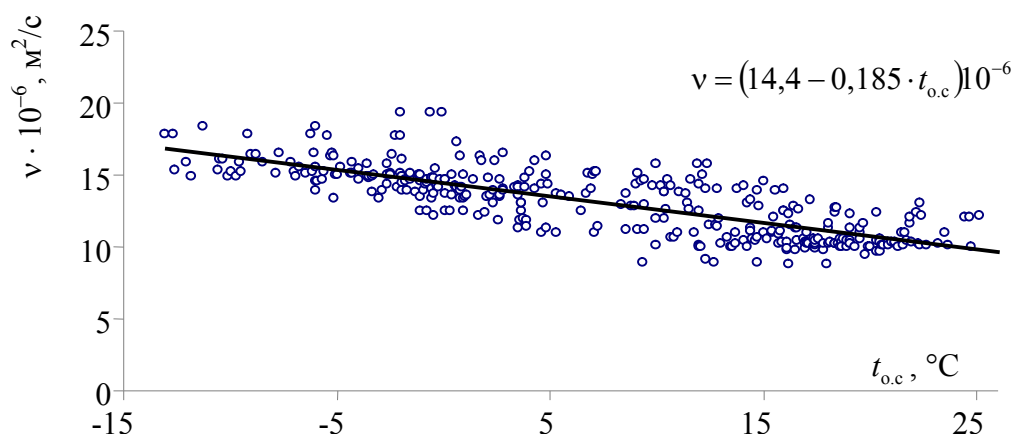


Рис. 2. Зависимость среднесуточной вязкости нефти участка нефтепровода «Мозырь – Адамова Застава» от среднесуточной температуры воздуха в г. Мозыре

Величины НПК предложено определять по выражению

$$k_{vi} = \frac{90 \cdot W^{t_{o.c}=t_{ср.кв_i}}}{90 \cdot W^{t_{o.c}=t_{ср.год}}} = \frac{\beta_p \cdot P_{ср} + \beta_t \cdot t_{ср.кв_i} + \beta_0}{\beta_p \cdot P_{ср} + \beta_t \cdot t_{ср.год} + \beta_0}, \text{ о. е.}, \quad (5)$$

где  $W^{t_{o.c}=t_{ср.кв_i}}$  – среднесуточное электропотребление при температуре окружающей среды, равной среднеквартальной, кВт·ч/сут;  $W^{t_{o.c}=t_{ср.год_i}}$  – среднесуточное электропотребление при температуре окружающей среды, равной средней за год по данным [4], кВт·ч/сут;  $P_{ср}$  – среднесуточный грузооборот за год, тыс. т·км/сут;  $t_{ср.кв_i}$  – среднеквартальная температура наружного воздуха  $i$ -го квартала, °C;  $t_{ср.год_i}$  – средняя за год температура наружного воздуха, °C.

Среднеквартальная температура  $t_{ср.кв_i}$  определяется как средневзвешенная по количеству суток в месяце:

$$t_{ср.кв_i} = \frac{\sum_{j=1}^3 t_{ср.мес_j} \cdot m_j}{\sum_{j=1}^3 m_j}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6)$$

где  $t_{ср.мес_j}$  – среднемесячная температура наружного воздуха за  $j$ -й месяц в  $i$ -м квартале, принимается по данным [4], °C;  $m_j$  – количество суток в  $j$ -м месяце, сут.

Прогнозирование электропотребления в зависимости от временного цикла можно классифицировать на оперативное, краткосрочное, внутримесячное, текущее и долгосрочное, годовое, перспективное [3]. При этом нормирование расхода ТЭР относится к задаче текущего и долгосрочного прогнозирования. При прогнозировании расхода ЭЭ участка нефтепровода за осенне-зимний или весенне-летний период в основу построения модели (4) ложится статистика за соответствующий период предыдущего года. При этом значения НПК (нормативное отклонение среднего электропотребления за квартал от среднего за осенне-зимний или весенне-летний период) будут отличаться от полученных по годовой статистической информации. Определим аналитическую взаимосвязь НПК, полученных по годовой и сезонной статистике. Также покажем, что

сумма НПК ( $k_v^c$ ), определенных по сезонной статистике, равна 2, а сумма НПК ( $k_v$ ), определенных по годовой статистике, равна 4.

Предполагая поквартальное равенство количества суток перекачки нефти по участку нефтепровода, среднесуточное электропотребление за год при неизменном среднесуточном грузообороте можно записать в виде:

$$W_{\text{ср.год}} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 W_{\text{ср.}i}, \text{ кВт}\cdot\text{ч/сут}, \quad (7)$$

где  $W_{\text{ср.}i}$  – среднесуточное электропотребление за  $i$ -й квартал, кВт·ч/сут.

Аналогично, среднесуточные значения электропотребления по сезонам года примут вид:

$$W_{\text{ср}}^{2,3} = 0,5(W_{\text{ср.}2} + W_{\text{ср.}3}), \text{ кВт}\cdot\text{ч/сут}; \quad (8)$$

$$W_{\text{ср}}^{1,4} = 0,5(W_{\text{ср.}1} + W_{\text{ср.}4}), \text{ кВт}\cdot\text{ч/сут}, \quad (9)$$

где  $W_{\text{ср.}1}$ ,  $W_{\text{ср.}2}$ ,  $W_{\text{ср.}3}$ ,  $W_{\text{ср.}4}$  – среднесуточные значения электропотребления соответственно за первый, второй, третий и четвертый кварталы, кВт·ч/сут.

Учитывая, что среднесуточные за квартал значения электропотребления можно выразить через среднесуточное за год электропотребление и соответствующий НПК ( $W_{\text{ср.}i} = k_{vi} \cdot W_{\text{ср.год}}$ ), формулы (8) и (9) можно переписать:

$$W_{\text{ср}}^{2,3} = 0,5 \cdot W_{\text{ср.год}} \cdot (k_{v2} + k_{v3}), \text{ кВт}\cdot\text{ч/сут}; \quad (10)$$

$$W_{\text{ср}}^{1,4} = 0,5 \cdot W_{\text{ср.год}} \cdot (k_{v1} + k_{v4}), \text{ кВт}\cdot\text{ч/сут}, \quad (11)$$

где  $k_{v1}$ ,  $k_{v2}$ ,  $k_{v3}$ ,  $k_{v4}$  – НПК соответственно первого, второго, третьего и четвертого кварталов, определенные по годовой статистической информации.

Величины НПК, характеризующие отклонение среднеквартального электропотребления от среднего за осенне-зимний или весенне-летний период, находятся по выражениям:

$$k_{v1}^c = \frac{W_{\text{ср.}1}}{W_{\text{ср}}^{1,4}}; k_{v2}^c = \frac{W_{\text{ср.}2}}{W_{\text{ср}}^{2,3}}; k_{v3}^c = \frac{W_{\text{ср.}3}}{W_{\text{ср}}^{2,3}}; k_{v4}^c = \frac{W_{\text{ср.}4}}{W_{\text{ср}}^{1,4}}. \quad (12)$$

Подставляя выражения (12) в (10) и (11) получим две системы уравнений, отражающие взаимосвязь между НПК, полученными по сезонной и годовой статистической информации:

$$\begin{cases} k_{v1}^c = \frac{2 \cdot k_{v1}}{k_{v1} + k_{v4}} \\ k_{v4}^c = \frac{2 \cdot k_{v4}}{k_{v1} + k_{v4}} \end{cases}, \begin{cases} k_{v2}^c = \frac{2 \cdot k_{v2}}{k_{v2} + k_{v3}} \\ k_{v3}^c = \frac{2 \cdot k_{v3}}{k_{v2} + k_{v3}} \end{cases}. \quad (13)$$

Сложив левые и правые части уравнения первой системы, получим:

$$k_{v1}^c + k_{v4}^c = \frac{2 \cdot k_{v1}}{k_{v1} + k_{v4}} + \frac{2 \cdot k_{v4}}{k_{v1} + k_{v4}} = 2. \quad (14)$$

Справедливость равенства  $k_{v2}^c + k_{v3}^c = 2$  доказывается аналогично.

Величины НПК, характеризующие отклонение среднеквартального электропотребления от среднего за год, находятся по выражению:

$$k_{vi} = W_{cp.i} / W_{cp.год} \quad (15)$$

Сумма коэффициентов  $k_{vi}$  с учетом (7) и (15) запишется в виде:

$$\sum k_{vi} = \sum W_{cp.i} / W_{cp.год} = 4 \cdot \sum W_{cp.i} / \sum W_{cp.i} = 4 \quad (16)$$

Использование систем (13) позволяет получить значения коэффициентов  $k_{vi}^c$  непосредственно через значения коэффициентов  $k_{vi}$ , минуя построение регрессионных моделей электропотребления по сезонной статистической информации. Тождества (14) и (16) позволяют производить проверку расчета коэффициентов  $k_v$  и  $k_v^c$ .

### Исследовательская часть

Произведем расчет НПК для участков нефтепровода РУП «Гомельтранснефть Дружба»: «Унеча – Мозырь», «Мозырь – Адамова Застава», «Мозырь – Броды». На основе суточной статистической информации за 2006 г. сформирована информационная база данных, включающая: расход ЭЭ ( $W$ ), грузооборот нефти ( $P$ ), температуру воздуха ( $t$ ) в г. Мозыре за 2006 г. (табл. 1).

Таблица 1

#### Фрагмент информационной базы данных по режимам электропотребления участка нефтепровода «Мозырь – Адамова Застава»

Дата	$W$ , кВт·ч/сут	$P$ , тыс. т·км/сут	$t_{0.с}$ , °С
02.01.2006	928830	62061	-0,09
03.01.2006	987400	61854	-1,45
04.01.2006	987020	61828	-4,41
05.01.2006	992470	63409	-5,46
06.01.2006	1000420	63488	-6,30

С использованием метода наименьших квадратов и скользящего среднего с периодом усреднения 90 сут построены модели электропотребления участков нефтепровода вида (4). Найденные коэффициенты уравнения регрессии сведены в табл. 2.

Таблица 2

#### Коэффициенты регрессии моделей электропотребления участков нефтепровода РУП «Гомельтранснефть Дружба»

Наименование участка	Коэффициенты регрессии		
	$\beta_P$ , кВт·ч/ тыс. т·км	$\beta_t$ , кВт·ч/сут·°С	$\beta_0$ , кВт·ч/сут
Унеча – Мозырь	18,30	-1509	-231767
Мозырь – Адамова Застава	31,74	-3498	-1016632
Мозырь – Броды	84,19	-159	-86197

Важным этапом построения модели является проверка качества уравнения регрессии. При увеличении грузооборота нефти затраты ЭЭ на транспорт нефти возрастают, что

выражается положительным коэффициентом регрессии при грузообороте. Знак коэффициента регрессии при температуре должен быть отрицательный, поскольку температура окружающей среды связана с вязкостью нефти обратно пропорциональной зависимостью. Рост вязкости нефти вызывает увеличение затрат ЭЭ на ее транспортировку. Знаки при полученных коэффициентах регрессии не противоречат физике протекания технологического процесса.

Проверка статистической значимости коэффициентов регрессии с  $m$  объясняющими переменными произведена на основе  $t$ -статистики [5]. При уровне значимости  $\alpha = 0,05$  наблюдаемое значение  $t$ -статистики сравнивалось с критической точкой  $t_{\alpha/2, n-m-1}$  распределения Стьюдента. Для участка «Мозырь – Адамова Застава» параметр  $t_{\beta_p}$  составляет 50,29, что превышает критическое значение  $t_{\alpha/2, n-m-1}$  ( $n = 252$ ), равное 1,648. Коэффициент регрессии является статистически значимым. Результаты проверки значимости коэффициентов регрессии сведены в табл. 3.

Таблица 3

### Проверка статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии

Наименование участка	Расчетная $t$ -статистика			Табличное значение $t$ -критерия
	$t_p$	$t_t$	$t_0$	
Унеча – Мозырь	38,82	-24,68	-12,20	1,648
Мозырь – Адамова Застава	50,29	-44,30	-26,39	
Мозырь – Броды	30,71	-7,83	-16,28	

Общая проверка значимости уравнения регрессии произведена с использованием критерия Фишера [3]. Рассчитанное значение сравнивалось с табличным [5] при  $(k-1)$ ,  $(n-k)$  степенями свободы и уровне надежности 0,95. При превышении рассчитанным значением табличного, практически невероятно, что все найденные значения коэффициентов регрессии обусловлены только случайными совпадениями. Для участка «Мозырь – Адамова Застава» параметр  $F$  составляет 1477, что превышает критическое значение  $F_{1-\alpha, (k-1, n-k)}$  ( $n = 252$ ), равное 3,0. Следовательно, можно сказать об общей статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии. Результаты проверки общей значимости коэффициентов регрессии сведены в табл. 4.

Таблица 4

### Проверка общей статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии

Наименование участка	Расчетная $F$ -статистика	Табличное значение $F$ -критерия
Унеча – Мозырь	1065	3,0
Мозырь – Адамова Застава	1477	
Мозырь – Броды	689	

Качество построенной модели характеризуется как максимальной относительной погрешностью  $\delta^{\max}$ , так и среднеквадратичным отклонением относительной погрешности  $\sigma$  [3]:

$$\delta^{\max} = \max \left\{ \delta_i = \left| 100 \frac{\varepsilon_i}{W_i} \right| \right\}_{i=1,2,\dots,n}, \quad \%, \quad (17)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-k-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2}, \%. \quad (18)$$

Проверка качества моделей электропотребления участков нефтепровода приведена в табл. 5. Результаты проверки показывают высокую точность моделирования электропотребления по наиболее энергоемким участкам нефтепровода «Унеча – Мозырь» и «Мозырь – Адамова Застава». Для участка «Мозырь – Броды» точность моделирования несколько ниже, однако с учетом малой энергоемкости участка (5 % от суммарного технологического потребления ЭЭ) может считаться удовлетворительной.

Таблица 5

#### Проверка качества построения уравнения регрессии

Наименование участка	$\delta^{\max}, \%$	$\sigma, \%$
Унеча – Мозырь	3,03	1,39
Мозырь – Адамова Застава	1,58	0,81
Мозырь – Броды	6,97	2,53

Полученные величины НПК при среднем грузообороте нефти по участкам нефтепровода приведены в табл. 6.

Таблица 6

#### Значения нормативных поправочных коэффициентов участков нефтепровода РУП «Гомельтранснефть Дружба»

Наименование участка	$k_{v1}$	$k_{v2}$	$k_{v3}$	$k_{v4}$	$\sum k_{vi}$
Унеча – Мозырь	1,034	0,981	0,969	1,015	4,0
Мозырь – Адамова Застава	1,042	0,976	0,961	1,019	4,0
Мозырь – Броды	1,023	0,986	0,978	1,010	4,0

#### Заключение

1. Предложен новый способ расчета нормативных поправочных коэффициентов (НПК), характеризующих нормативное отклонение среднесуточного электропотребления участка нефтепровода за квартал от среднесуточного за год, основанный на построении двухфакторной аддитивной регрессионной модели зависимости электропотребления участка нефтепровода от грузооборота нефти и температуры окружающей среды, отличающийся учетом температуры окружающей среды за многолетний период наблюдений, позволяющий более объективно прогнозировать и нормировать квартальный удельный расход ЭЭ на транспортировку нефти в условиях неопределенной исходной информации.

2. Предложены выражения, позволяющие получить значения НПК, характеризующие отклонение среднесуточного электропотребления участка нефтепровода за квартал от среднесуточного за осенне-зимний или весенне-летний период ( $k_v^c$ ), непосредственно через значения НПК, характеризующие отклонение среднесуточного электропотребления участка нефтепровода за квартал от среднесуточного за год ( $k_v$ ), без построения регрессионных моделей электропотребления за осенне-зимний или весенне-летний период.

#### Литература

1. О Республиканской программе энергосбережения на 2006–2010 годы : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 2 февр. 2006 г., № 137 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2006. – № 24. – 5/17219.
2. Об утверждении Положения о нормировании расхода топлива, тепловой и электрической энергии в народном хозяйстве Республики Беларусь : постановление Комитета по энергоэффективности при Совете Министров Республики Беларусь от 19 ноября 2002 г. № 9 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2006. – № 24. – 5/17219.
3. Анищенко, В. А. Оценка и нормирование показателей энергоэффективности предприятий трубопроводного транспорта нефти / В. А. Анищенко, Н. В. Токочакова. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007. – 233 с.
4. Строительная климатология : СНБ 2.04.05 – 2000. – Введ. 1.07.2001. – Минск : Минстройархитектуры, 2001. – 37 с.
5. Бородич, С. А. Вводный курс эконометрики : учеб. пособие / С. А. Бородич. – Минск : БГУ, 2000. – 354 с.

*Получено 11.05.2007 г.*