

УДК 621.311

## СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ РАСЧЕТНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

**Н. В. ТОКОЧАКОВА, Д. Р. МОРОЗ**

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

Необходимым прямым и косвенным инструментом Государственной политики энергосбережения является механизм нормирования расхода топлива и энергии для технологических процессов, установок, продукции [1]. Нормирование потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) необходимо для определения энергетической составляющей затрат в структуре себестоимости продукции и для оценки энергоэффективности (ЭЭФ).

В практике нормирования электропотребления в настоящее время признанными являются следующие методы определения удельного расхода электрической энергии (ЭЭ) на производство продукции: опытный, отчетно-статистический, расчетно-статистический, расчетно-аналитический или их сочетание.

**Опытный метод** разработки норм расхода ЭЭ заключается в определении удельных затрат ЭЭ по данным, полученным в результате эксперимента. Для проведения эксперимента оборудование должно быть в технически исправном состоянии и отлажено, а технологический процесс должен осуществляться в режиме, предусмотренном технологическими регламентами и инструкциями. При этом загрузка энергетического и технологического оборудования по мощности и производительности должна соответствовать проектной. Кроме того, в нормы расхода ЭЭ не должны включаться затраты ресурса, вызванные «нестандартными» ситуациями. Норма расхода, полученная из эксперимента, не учитывает возможности изменения технологических факторов, влияющих на режимы электропотребления промышленного потребителя (ПП).

Видно, что для расчета норм на основе опытного метода необходим запланированный многофакторный эксперимент. Проведение такого эксперимента является для большинства ПП трудоемким мероприятием. Данные, полученные по результатам эксперимента, отражают удельный расход ЭЭ для режимов работы предприятия, соответствующих проектным. Большинству современных ПП свойственны частые изменения производственной программы, поэтому режимы их работы не соответствуют проектным.

Так, например, на рис. 1 представлена статистика изменения удельного расхода ЭЭ и производства продукции предприятия, специализирующегося на производстве изделий из пластмасс. Как видно из рис. 1, определение средних значений удельного расхода ЭЭ и объемов производства продукции ( $W_{\text{ср}}$  и  $P_{\text{ср}}$ , соответственно), не характеризует существующие режимы электропотребления предприятия, так как фактические значения удельного расхода изменяются при изменении объемов производства и отличаются от  $W_{\text{ср}}$  более чем на 50 %.

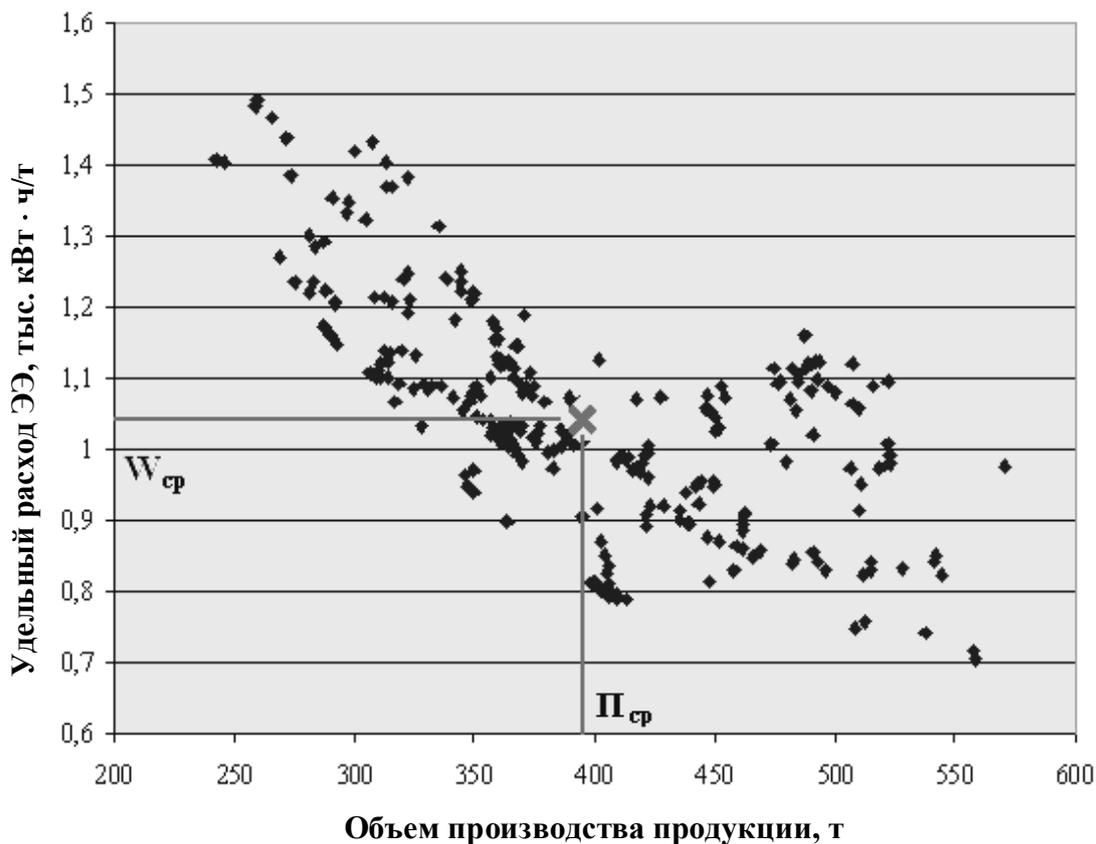


Рис. 1. Изменение электропотребления ПП, специализирующихся на переработке пластмасс

Реальной базой для анализа и планирования норм расхода ЭЭ следует признать статистические данные о фактических режимах работы ПП, обработанные методами математической статистики.

**Расчетно-аналитический метод** предусматривает определение норм расхода ЭЭ расчетным путем по статьям расхода на основе электрических балансов.

Индивидуальные нормы определяются на базе теоретических расчетов или экспериментально установленных нормативных характеристик энергопотребляющих агрегатов и установок, с учетом достигнутых прогрессивных показателей удельного расхода ЭЭ и внедряемых мероприятий по экономии электроэнергии.

При расчете прироста или уменьшения удельных расходов ЭЭ на элементы производственного процесса учитываются затраты, связанные с изменением условий производства, а также с проведением организационно-технических мероприятий по экономии энергоресурсов.

Норма расхода ЭЭ, определенная расчетно-аналитическим методом для существующих условий работы, так же как и в первом случае, будет представлять собой лишь единичное значение удельного расхода ЭЭ из множества возможных.

Групповые нормы рассчитываются на основе индивидуальных норм расхода и соответствующих объемов производства или, исходя из удельных расходов ЭЭ предыдущего периода с учетом достигнутых прогрессивных показателей расхода ЭЭ и планируемых мероприятий по экономии электроэнергии. В ходе расчетов учитываются реальные условия производства, осуществляется корректировка норм с учетом фактического состояния оборудования и режима его работы, а также действительных параметров производственных процессов.

Учет режимов работы каждой единицы технологического оборудования для большинства ПП предполагает большую трудоемкость расчетов и сложность системы сбора параметров режимов электропотребления. Поэтому для ПП, работающих в условиях изменяющейся производственной программы и имеющих значительный парк технологического оборудования (табл. 1), данный метод определения удельного расхода ЭЭ на производство продукции неприемлем.

Таблица 1

### Количественные и качественные показатели технологического парка ПП

Предприятие	Количество электроприемников, шт.	Средняя мощность электроприемника, кВт
Завод сельскохозяйственных машин	43900	7,8
Нефтеперерабатывающий завод	4200	53,9
Завод искусственного волокна	12300	11
Фабрика по производству обоев	400	24,7
Консервный завод	200	6,5
Газоперерабатывающий завод	2700	40,7

**Отчетно-статистический метод** предусматривает определение норм расхода ЭЭ на основе анализа данных форм статистической отчетности о фактических удельных расходах ЭЭ за ряд предшествующих лет. При расчете норм учитываются изменения в технологии и задание по экономии ЭЭ. Задание по экономии ЭЭ не учитывает реальный потенциал энергосбережения на предприятии и задается в виде процентного снижения удельного расхода от достигнутого значения в отчетном периоде.

На рис. 2 приведено изменение удельного расхода ЭЭ и общего электропотребления ПП, выпускающего мебельную фурнитуру. При планировании удельного расхода ЭЭ на второй год по результатам работы в первом году, ПП отчиталось за экономию ЭЭ, которая подтверждается снижением общего расхода ЭЭ. При планировании на третий год по данным предыдущего года предприятие должно было бы снизить достигнутый удельный расход ЭЭ в соответствии с заданием. Как видно из рис. 2, фактический удельный расход ЭЭ увеличился в третьем году при снижении общего расхода ЭЭ. Снижение общего электропотребления связано с уменьшением объемов выпуска продукции, а значительное увеличение удельного расхода ЭЭ (64 %) объясняется введением дополнительного технологического оборудования.

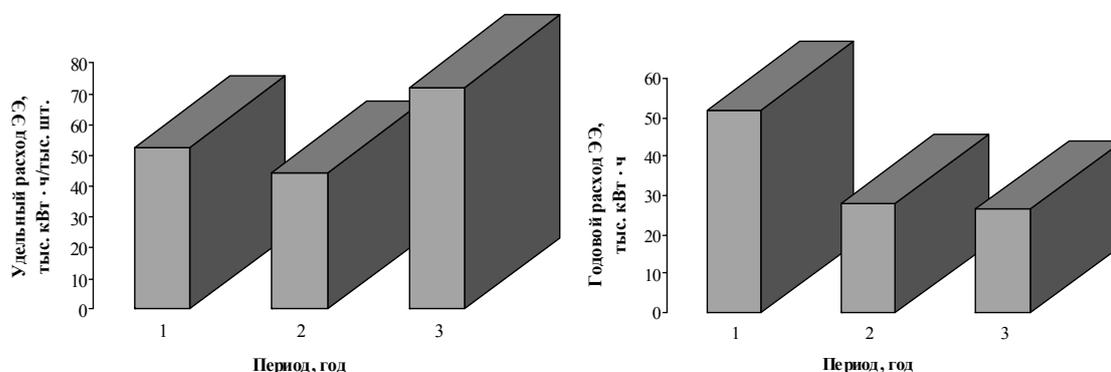


Рис. 2. Годовая динамика удельного и общего расхода ЭЭ для ПП, выпускающего мебельную фурнитуру

Отчетно-статистический метод не позволяет выявлять факторы, влияющие на изменение удельного расхода ЭЭ и, следовательно, не позволяет определить основные направления снижения удельного расхода ЭЭ для ПП.

**Расчетно-статистический метод** основан на разработке экономико-статистической модели в виде зависимости фактического удельного расхода ЭЭ от воздействующих факторов.

Порядок расчета норм следующий:

- в соответствии с технологическим процессом определяются наиболее существенные факторы, влияющие на удельный расход энергоресурсов (производительность, загрузка оборудования, режим работы, параметры технологического процесса и т. п.);
- формируется информационная база данных (ИБД) с использованием данных статистической отчетности и оперативного учета о расходе ЭЭ и величинах исследуемых факторов;
- с помощью метода наименьших квадратов определяются эмпирические зависимости расхода ЭЭ от влияющих факторов.

Любая математическая модель позволяет учесть влияние на исследуемый процесс тех факторов, значения которых изменялись в течение исследуемого периода времени, кроме того, влияние воздействующих факторов на удельный расход ЭЭ со временем может измениться, поэтому модель удельного расхода ЭЭ должна периодически уточняться.

*Из перечисленных методов нормирования в условиях постоянного изменения технологических факторов (объемы производства, модернизация и реконструкция технологического оборудования) наиболее объективным является расчетно-статистический метод нормирования ЭЭ, основанный на фактических данных о расходе ЭЭ и параметрах технологического процесса, формирующих режим электропотребления.*

Анализ текущего состояния дел в нормировании для 200 ПП одной из областей Республики Беларусь показал, что *основным методом для расчета удельных расходов ЭЭ на выпуск продукции является расчетно-аналитический. При этом у 92 % ПП нормы разработаны без учета возможного изменения объемов выпускаемой продукции.* Это обстоятельство приводит к тому, что более 50 % ПП вынуждены ежеквартально корректировать утвержденные нормы расхода ЭЭ на выпускаемую продукцию в связи с изменениями производственной программы.

Преимущества расчетно-статистических моделей удельного расхода ЭЭ от влияющих факторов являются очевидными. Основу построения моделей составляют статистические данные, соответствующие существующим режимам работы предприятия. В зависимости от организации системы учета ЭЭ дискретизация статистики может варьироваться от квартальной и месячной до суточной. Использование суточной статистики позволяет улучшить качество моделей удельного и общего электропотребления, поскольку обеспечивает больший объем статистического материала.

У большинства ПП режим потребления ЭЭ может быть описан однофакторными математическими моделями удельного расхода ЭЭ в зависимости от объемов произведенной продукции:

$$W_{уд} = \frac{W_{уд.техн} \cdot \Pi}{\Pi} + \frac{W_{общ}}{\Pi} = W_{уд.техн} + \frac{W_{общ}}{\Pi}, \text{ кВт}\cdot\text{ч/ед. прод.}, \quad (1)$$

где  $\Pi$  – объем выпущенной продукции, ед. прод.;  $W_{общ}$  – объем потребленной ЭЭ, не зависящий от объемов производства продукции, кВт·ч;  $W_{уд.техн}$  – удельный техноло-

гический расход ЭЭ, кВт·ч/ед. прод., который для большинства ПП является неизменным.

Расчетно-статистическая модель удельного расхода ЭЭ в зависимости от объемов произведенной продукции позволяет:

- производить расчет плановой потребности ЭЭ в условиях изменяющейся производственной программы;
- выполнять анализ существующих режимов электропотребления ПП и оценивать их ЭЭФ;
- оценивать потенциал ЭЭФ за счет повышения загрузки технологического оборудования и наращивания объемов выпуска продукции;
- алгоритмизировать процесс разработки норм расхода ЭЭ.

При построении моделей для конкретного ПП основным этапом является разделение общезаводского расхода ЭЭ по отчетным группам продукции. Сложность решения этой задачи определяется как номенклатурой выпускаемой продукции, так и организацией системы учета ЭЭ на предприятии.

Рассмотрим способы построения однофакторных расчетно-статистических моделей удельного расхода ЭЭ от объемов выпуска продукции для ПП с различным уровнем организации учета расхода ЭЭ и номенклатуры выпускаемой продукции.

**Пример 1.** Предприятие не имеет технического учета расхода ЭЭ. В качестве исходных данных используются статистика по суточным объемам выпущенной продукции и расходу ЭЭ (по счетчику коммерческого учета).

Общее электропотребление такого ПП может быть представлено в виде:

$$W = W_{\Sigma_{\text{общ}}} + W_{\text{техн}}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (2)$$

где  $W_{\Sigma_{\text{общ}}}$  – суммарное общезаводское электропотребление, кВт·ч, не зависящее от объема выпускаемой продукции;  $W_{\text{техн}}$  – технологическое электропотребление, кВт·ч, определяемое как:

$$W_{\text{техн}} = \sum (\Pi_i \cdot W_{\text{уд.техн.}i}), \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (3)$$

где  $\Pi_i$  – объем перерабатываемого сырья для производства  $i$ -го вида продукции, ед. сырья;  $W_{\text{уд.техн.}i}$  – удельный технологический расход ЭЭ, кВт·ч/ед. сырья, на производство  $i$ -го вида продукции.

Зависимость расхода ЭЭ от объемов производства продукции имеет вид:

$$W = W_{\Sigma_{\text{общ}}} + \sum_{i=1}^{i=n} (\Pi_i \cdot W_{\text{уд.техн.}i}), \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (4)$$

где  $n$  – количество видов выпускаемой продукции.

Технологический процесс предприятия предполагает выпуск трех видов продукции, которая производится в разных цехах. Для производства каждого вида продукции может быть использовано два вида сырья, значительно отличающиеся друг от друга энергоемкостью. Удельный расход ЭЭ по каждому виду продукции будет дифференцироваться по подвидам, в зависимости от исходного сырья. Зависимость удельного расхода ЭЭ от объемов производства продукции для  $i$ -го вида продукции может быть представлена как:

$$W_{уд,i} = W_{уд,техн,i} + \frac{\sum_{i=1}^{i=k} W_{общ,i}}{\sum_{i=1}^{i=k} \Pi_i}, \text{ кВт}\cdot\text{ч/ед. прод.}, \quad (5)$$

где  $k$  – количество подвидов выпускаемой продукции в каждом виде.

Алгоритм построения модели  $W_{уд} = F(\Pi)$  по видам продукции следующий:

1. Составляется ИБД, содержащая сведения об ежесуточном суммарном потреблении ЭЭ ( $W_{\sum_{сут}}$ ) и ежесуточном выпуске по каждому из видов выпускаемой продукции ( $\Pi_{\sum_{сут,i}}$ ).

2. С помощью метода наименьших квадратов определяется уравнение вида (4) и, соответственно, численные значения  $W_{уд,техн,i}$  и  $W_{\sum_{общ}}$ .

3. Из общезаводского электропотребления  $W_{\sum_{общ}}$ , в соответствии с технологическим процессом, выделяются доли электропотребления, приходящиеся на каждую из технологических линий  $\sum_{i=1}^{i=k} W_{общ,i}$ .

4. По полученным данным для каждого вида продукции строится модель изменения удельного расхода ЭЭ от объемов выпускаемой продукции вида (5).

Результаты построения моделей по описанному алгоритму приведены в табл. 2. Внешний вид моделей представлен на рис. 3, где выделенная область соответствует существующему разбросу производственной программы предприятия. Как видно из данного рисунка, удельный расход ЭЭ в существующих условиях изменяется более чем на 80 %, в зависимости от объемов выпускаемой продукции.

Таблица 2

Основные характеристики моделей удельного расхода ЭЭ

Класс выпускаемой продукции	Вид сырья	Удельный технологический расход ЭЭ, кВт·ч/т	Квартальный расход ЭЭ, не зависящий от объема выпускаемой продукции, тыс. кВт·ч/кв.	Коэффициент детерминации $R^2$ построенной модели
Производство пленки	Полипропилен	135	80	0,945
	Полистирол	110		
Производство контейнеров	Полипропилен	1252	120	
	Полистирол	681		
Производство гранул	Полипропилен	280	10	
	Полистирол	231		

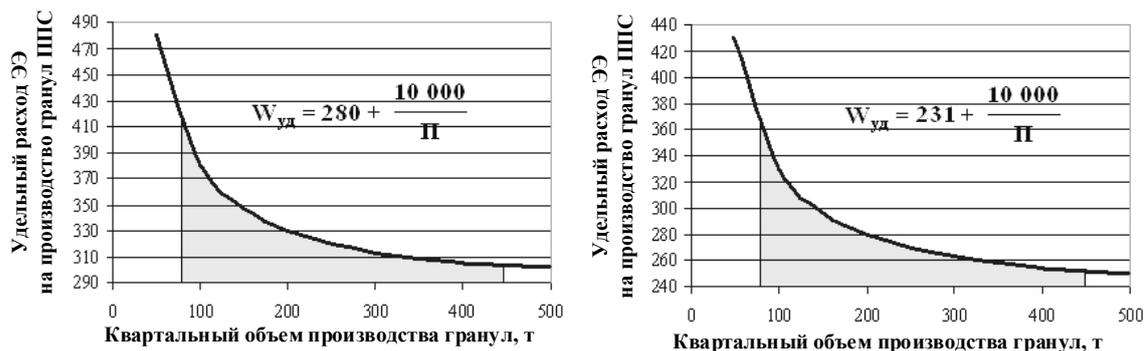


Рис. 3. Зависимость изменения общезаводского удельного расхода ЭЭ на производство изделий из пластмассы

**Пример 2.** На предприятии организован цеховой технический учет расхода ЭЭ. В соответствии с технологическим процессом в ряде цехов производится выпуск различных видов продукции. Вся производимая продукция имеет общую сырьевую базу, готовящуюся на предприятии.

Разделение общезаводского расхода ЭЭ производится в соответствии со следующим алгоритмом.

1. Из общезаводского электропотребления выделяются дополнительные затраты ЭЭ по группам продукции относительно затрат ЭЭ на подготовку сырьевой базы:

$$W_{i,j}^{\text{VAR}}; W_{i,j}^{\text{CONST}}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (6)$$

где  $i$  – индекс группы продукции;  $j$  – индекс месяца; var – технологическая составляющая расхода ЭЭ, зависящая от объема выпущенной  $i$ -й группы продукции; const – общецеховые затраты ЭЭ на выпуск  $i$ -й группы продукции.

2. Рассчитываются общезаводские затраты ЭЭ на подготовку сырьевой базы, путем вычитания из суммарного электропотребления ПП за период выделенных дополнительных затрат:

$$W_j^{\text{OЗ}} = W_{\Sigma,j} - \sum_{i=1}^N (W_{i,j}^{\text{var}}(\Pi_{i,j}) + W_{i,j}^{\text{const}}), \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (7)$$

где  $W_{\Sigma,j}$  – суммарное месячное электропотребление предприятия, кВт · ч;  $\Pi_{i,j}$  – объем выпуска продукции за  $j$ -й месяц  $i$ -й группы;  $N$  – количество групп выпускаемой продукции, ед. прод.

3. Рассчитывается базисный удельный общезаводской расход ЭЭ на суммарный выпуск продукции:

$$C_{\text{уд},j}^{\text{баз}} = W_j^{\text{OЗ}} / \sum_{i=1}^N \Pi_{i,j}, \text{ кВт} \cdot \text{ч /ед. прод.}, \quad (8)$$

4. Рассчитываются удельные расходы ЭЭ по каждой группе продукции как:

$$C_{\text{уд},i,j} = C_{\text{уд},j}^{\text{баз}} + (W_{i,j}^{\text{var}}(\Pi_{i,j}) + W_{i,j}^{\text{const}}) / \Pi_{i,j}, \text{ кВт} \cdot \text{ч /ед. прод.}, \quad (9)$$

Как видно из выражения (9), удельный расход ЭЭ для предприятий с общей сырьевой базой зависит от двух факторов: объема производства каждого вида продукции в отдельности и суммарного объема производства. На рис. 4 представлена

зависимость удельного расхода ЭЭ на производство  $i$ -го вида продукции от указанных факторов.

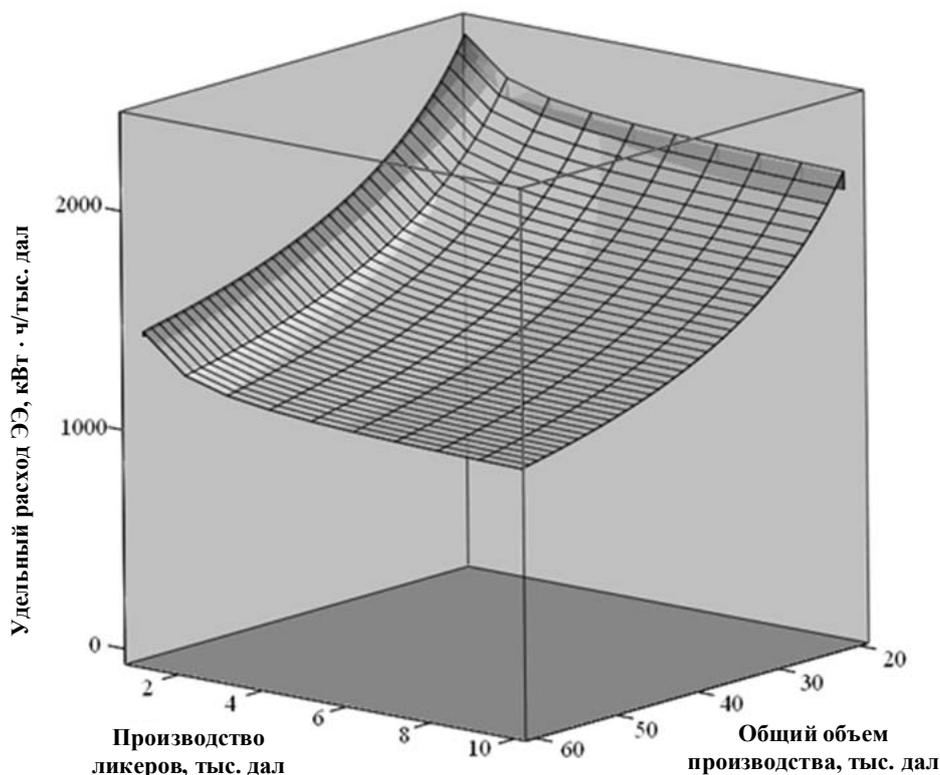


Рис. 4. Зависимость удельного расхода ЭЭ на производство  $i$ -го вида продукции от воздействующих факторов, для предприятий с общей сырьевой базой

Однако использование поверхности для разработки норм расхода ЭЭ сопряжено с усложнением алгоритма и увеличением трудоемкости использования рассчитанных норм.

Разработку норм расхода ЭЭ предложено производить для условий фиксированной структуры производимой продукции: при постоянном удельном весе каждого вида продукции в общем объеме производства.

5. По каждой группе продукции формируются временные ряды удельного расхода ЭЭ и объемов выпущенной продукции:

$$\{C_{уд,i,j}\}_{j=1,\bar{n}}; \{\Pi_{i,j}\}_{j=1,\bar{n}}.$$

6. Полученные временные ряды сглаживаются скользящим средним.

7. С помощью регрессионного анализа строятся расчетно-статистические модели удельного расхода ЭЭ на выпуск  $i$ -й группы продукции.

Таблица 3

**Исходные данные и результаты расчета удельных расходов ЭЭ  
по трем группам продукции**

Месяц	$\Pi_1$ , тыс. дал	$\Pi_2$ , тыс. дал	$\Pi_3$ , тыс. дал	$W_{\sum j}$ , тыс. кВт·ч	$C_{уд.1j}$ , кВт·ч /тыс. дал	$C_{уд.2j}$ , кВт·ч /тыс. дал	$C_{уд.3j}$ , кВт·ч /тыс. дал	$W_p$ , тыс. кВт·ч	Погрешность расчета, %
1	53,79	4,38	2,10	36,5	554,71	1227,2	606,1	36,48	0,04
2	68,85	0,636	4,43	41,5	548,73	1664,8	600,1	41,50	0,00
3	65,35	7,027	8,60	44	481,67	1125,8	533,1	43,97	0,06
4	57,69	7,4	4,17	39,7	501,13	1142,9	552,5	39,67	0,07
5	68,43	5,9	4,59	29,9	326,75	979,8	378,2	29,88	0,08
6	67,33	5,217	5,27	34,9	400,48	1060,9	451,9	34,88	0,06
7	43,96	4,79	–	25,9	465,43	1131,5	–	25,88	0,07
8	56,54	6,129	2,76	27,3	353,73	1004,7	405,1	27,28	0,09
9	59,20	2,53	6,7	35,4	484,70	1212,3	536,1	35,35	0,02
10	51,95	4,79	4,75	32,5	472,36	1138,4	523,8	32,48	0,06
11	35,70	5,47	7,20	38,4	710,95	1368,4	762,4	38,35	0,05
Итого:	628,80	54,269	50,57	385,94	473,11	1085,4	524,5	385,73	0,05

По результатам расчета были построены зависимости (рис. 5) удельного расхода ЭЭ на производство  $i$ -го вида продукции от объема производства.

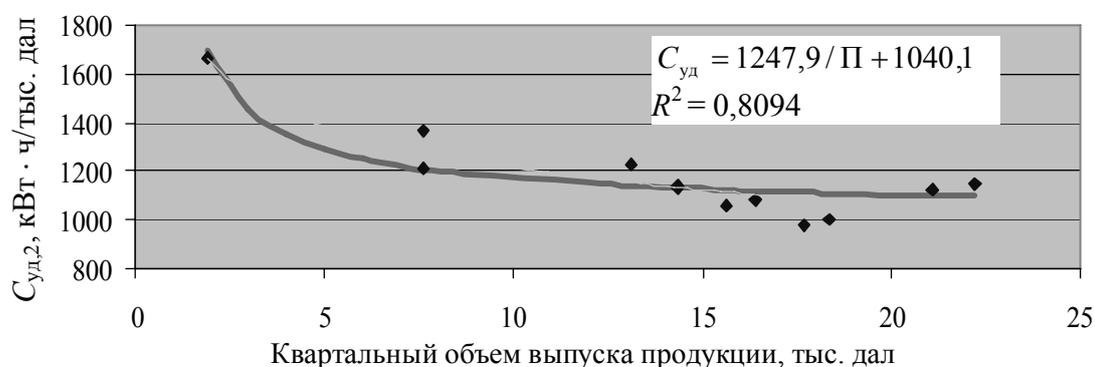


Рис. 5. Расчетно-статистические модели зависимости удельного расхода ЭЭ от объемов выпуска продукции для предприятия, имеющего общую сырьевую базу

Данный способ разработки норм реализован для ряда ПП Гомельской области, в том числе для ОАО «Гомельский ликероводочный завод».

### Выводы

1. Анализ существующих методов разработки удельных расходов электроэнергии показал, что наиболее адекватным в условиях постоянного изменения технологических факторов является расчетно-статистический метод, основанный на построении зависимостей изменения удельного расхода ЭЭ от воздействующих факторов.

2. Для большинства промышленных потребителей, электропотребление которых зависит от одного фактора – объема выпуска продукции, предложена гиперболическая модель удельного расхода электроэнергии.

3. Разработаны алгоритмы построения расчетно-статистических моделей для промышленных потребителей с различным уровнем организации учета расхода электроэнергии и номенклатуры выпускаемой продукции.

#### **Литература**

1. Закон Республики Беларусь об энергосбережении. – Минск : [б. и.], 1999.
2. Положение о нормировании расхода топлива, тепловой и электрической энергии в народном хозяйстве Республики Беларусь. – Минск : [б. и.], 2002.

*Получено 10.03.2006 г.*