

УДК 621.311

## ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

**Н. В. ТОКОЧАКОВА, Д. Р. МОРОЗ**

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

### Введение

Приоритетным направлением государственной политики Республики Беларусь является политика энергосбережения. Принятый «Закон об энергосбережении» [1] обязывает потребителей топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), независимо от форм собственности, рационально использовать ТЭР.

Под рациональным использованием ТЭР понимают достижение максимальной эффективности использования энергии при существующем уровне развития техники и технологии. Контроль за рациональным использованием ТЭР у промышленных потребителей (ПП) осуществляется с использованием показателей энергоэффективности (ЭЭФ). В соответствии с «Законом об энергосбережении» показателями энергетической эффективности являются научно обоснованная абсолютная или удельная величина потребления ТЭР на производство единицы продукции, установленная нормативными документами. С 1998 г. в республике введен еще один показатель, позволяющий оценивать ЭЭФ использования ТЭР – целевой показатель по энергосбережению.

### Постановка задачи

Ставится задача исследования современных показателей энергоэффективности и возможность их применения в условиях постоянно изменяющейся производственной программы.

Рассмотрим показатели эффективности использования электрической энергии (ЭЭ):

- Абсолютная величина электропотребления за отчетный период. Данный показатель отражает изменение общего электропотребления ПП, не раскрывая при этом факторов, влияющих на его изменение.

Например, для ПП, специализирующегося на выпуске швейных изделий (рис. 1), в течение двух лет наблюдалось снижение суммарного электропотребления, что обуславливалось снижением объемов производства, а не внедрением энергосберегающих мероприятий. То есть, изменение производственной программы ПП напрямую влияет на величину суммарного электропотребления.

Следовательно, абсолютная величина электропотребления как показатель ЭЭФ, может использоваться для потребителей не производящих продукцию, например, объектов соцкультбыта.

- Удельная величина электропотребления на производство единицы продукции. Данный показатель является основным для ПП республики и, в соответствие с положением о нормировании, определяется из выражения:

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

где  $W_{ПП}$  – объем потребленной ЭЭ, кВт·ч, на производство продукции  $\Pi$ , ед. прод.

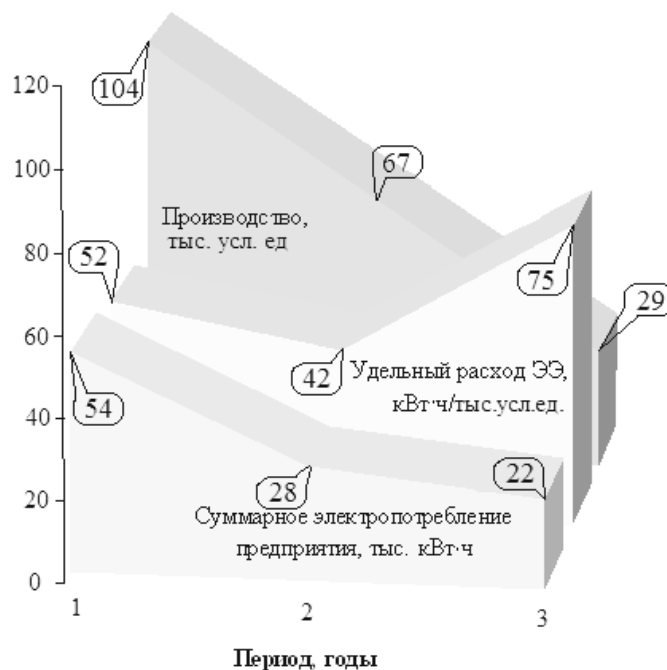


Рис. 1. Диаграмма изменения суммарного и удельного расхода ЭЭ по годам для швейного производства

Удельный расход ЭЭ является показателем энергоэффективности отдельного вида выпускаемой продукции. Затраты ЭЭ на производство конкретного вида продукции зависят от большого числа факторов. В первую очередь на расход ЭЭ влияют: производственная программа, характеристики сырья и окружающей среды.

На рис. 2 представлен расход ЭЭ (сглаженный скользящим средним с периодом усреднения 90 суток), технологической линией производства пленки в зависимости от объемов выпуска продукции. Нормированный коэффициент детерминации полученной модели  $R^2 = 0,98$ , что соответствует высокой аппроксимирующей способности модели. Значение технологического расхода ЭЭ на выпуск одного и того же объема продукции ( $\Pi$ ), изменяется в диапазоне от  $W'_1$  до  $W''_1$ , что обуславливается изменением, как характеристик сырья, так и параметров окружающей среды.

Оценка энергоэффективности ПП в этих условиях должна производиться в сопоставимых условиях: путем сравнения удельных расходов ЭЭ отчетного и базисного периодов.

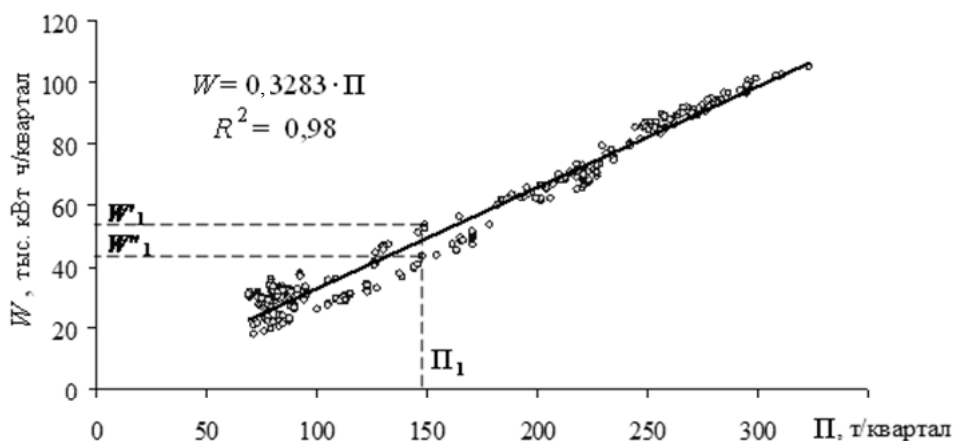


Рис. 2. Расход ЭЭ технологической линией производства пленки в зависимости от квартального объема выпуска продукции

Из рис. 3 видно, что изменение удельного расхода ЭЭ, обусловленное изменением производственной программы ( $\Delta W_{уд1}$ ), значительно больше изменения, обусловленного остальными факторами ( $\Delta W_{уд2}$ ). Поэтому для большинства ПП допускается приведение удельных расходов к сопоставимым условиям только с учетом объемов выпускаемой продукции.

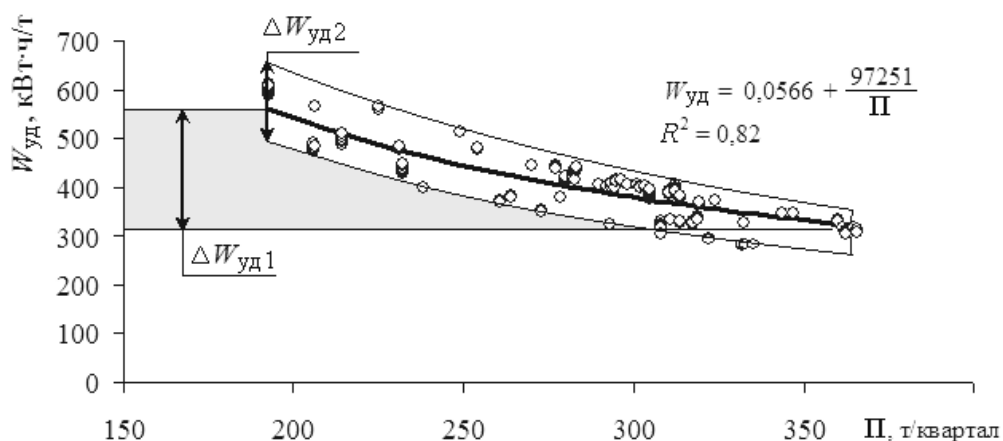


Рис. 3. Изменение удельного расхода ЭЭ в зависимости от квартального объема выпускаемой продукции

Конъюнктура рынка формирует производственную программу большинства ПП. Поэтому изменение производственной программы носит вероятностный характер.

Значение удельного расхода ЭЭ на производство продукции за отчетный период (квартал, год) отражает лишь единичное – среднее значение из всей совокупности возможных значений (рис. 4). Как видно из рис. 4, среднее значение удельного расхода ЭЭ за рассматриваемый период для ПП составило 821 кВт·ч/т. Однако реальный удельный расход ЭЭ изменялся за рассматриваемый период от 595 до 1215 кВт·ч/т.

Судить однозначно об эффективности использования ЭЭ по динамике удельного расхода ЭЭ за различные промежутки времени не представляется возможным, т. к. причины, обуславливающие изменение удельного расхода ЭЭ, не выявлены.

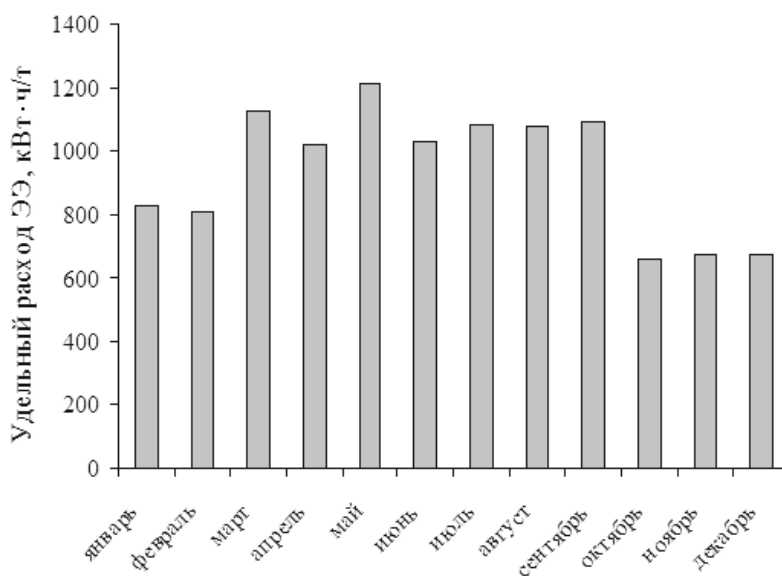


Рис. 4. Динамика среднемесячных удельных расходов ЭЭ на производство изделий из пластмасс

Оценка ЭЭФ с использованием удельного расхода ЭЭ за отчетный период возможна только для ПП со стабильной производственной программой.

*Для большинства ПП, работающих в условиях изменяющейся производственной программы, оценка ЭЭФ с помощью данного показателя должна производиться с учетом приведения значений удельного расхода ЭЭ предыдущего периода к сопоставимым условиям отчетного периода.*

- Целевой показатель по энергосбережению – интегральный показатель энергоэффективности, характеризующий производственную деятельность всего ПП по реализации мер направленных на эффективное использование и экономное расходование ТЭР на всех стадиях его потребления, определяется из выражения:

$$\text{ЦП} = \frac{\text{ОЭЗ}^{\circ}}{\text{ОЭЗ}^{\text{б}}} 100 \% - J_{\text{ПП}}, \% \quad (2)$$

где  $\text{ОЭЗ}^{\circ}$  – обобщенные энергозатраты отчетного периода, т у. т.;  $\text{ОЭЗ}^{\text{б.о}}$  – обобщенные энергозатраты базисного периода, приведенные к условиям отчетного, т у. т.;  $J_{\text{ПП}}$  – темпы изменения объемов производства промышленной продукции в сопоставимых условиях, %.

Целевой показатель ежегодно устанавливается в качестве одного из основных показателей социально-экономического и производственного развития Республики Беларусь постановлением Совета Министров Республики Беларусь и значение его доводится в виде задания республиканским органам управления и ПП.

В основу расчета целевого показателя по энергосбережению заложено условие, что потребление ТЭР (в том числе и ЭЭ) ПП прямо пропорционально объему выпускаемой продукции. Поэтому приведение обобщенных затрат базисного периода к условиям отчетного для промышленных предприятий производится по выражению:

$$\text{ОЭЗ}^{\text{б.о}} = \text{ОЭЗ}^{\text{б}}_{\text{пр}} + \text{ОЭЗ}^{\text{б}}_{\text{пр}} \left( \frac{J_{\text{ПП}} - 100}{100} \right), \text{ т у. т.}, \quad (3)$$

где  $\text{ОЭЗ}^{\text{б}}_{\text{пр}}$  – обобщенные энергозатраты базисного периода не приведенные к условиям отчетного и связанные с выпуском промышленной продукции, т у. т.

Рассмотрим влияние изменения электропотребления ПП на формирование целевого показателя по энергосбережению. Электропотребление ПП зависит от большого количества факторов, является случайной величиной и может быть представлено в виде двух основных составляющих:

$$W_{\text{ПП}} = W_{\text{техн}} + W_{\text{общ}}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (4)$$

где  $W_{\text{техн}}$  – расход ЭЭ на реализацию технологического процесса, кВт·ч;  $W_{\text{общ}}$  – общепроизводственный и вспомогательный расход ЭЭ, связанный с обеспечением деятельности ПП, является условно-постоянной величиной и не зависит от выпуска продукции, кВт·ч.

Технологический расход ЭЭ определяется большим числом воздействующих факторов, таких как параметры сырья, состояние окружающей среды, производственная программа. Как указывалось ранее, для большинства ПП последний из факторов оказывает наибольшее воздействие на величину технологического электропотребления.

Рассмотрим ситуацию характерную для большинства ПП, когда параметры сырья являются неизменными, а состояние окружающей среды не оказывает влияния

на величину технологического расхода ЭЭ. В этом случае технологический расход ЭЭ пропорционален объему выпуска продукции:

$$W_{\text{техн}} = W_{\text{уд.техн}} \cdot \Pi, \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (5)$$

где  $W_{\text{уд.техн}}$  – удельный технологический расход ЭЭ на производство единицы продукции, кВт·ч/ед. прод.;  $\Pi$  – объем произведенной продукции, ед. прод.

Тогда общее электропотребление ПП представляет собой зависимость:

$$W_{\text{ПП}} = W_{\text{уд.техн}} \cdot \Pi + W_{\text{общ}}. \quad (6)$$

При неизменном общезаводском расходе ЭЭ и удельном технологическом расходе ЭЭ электропотребление ПП представляет собой линейную зависимость от объема выпускаемой продукции. На рис. 5 представлено построение модели электропотребления вида (5) для ПП специализирующемся на переработке пластмасс.

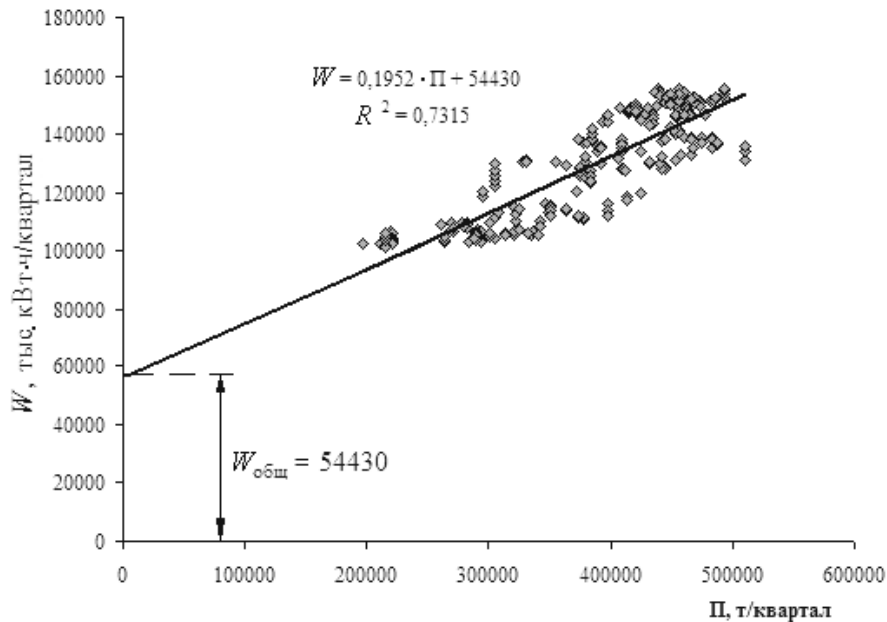


Рис. 5. Модель электропотребления ПП, специализирующегося на переработке пластмассы

С учетом модели электропотребления ПП, целевой показатель по энергосбережению для предприятия, на котором не было произведено энергосберегающих мероприятий, а изменился лишь объем выпускаемой продукции, может быть рассчитан как:

$$\text{ЦП} = \left( \frac{W_{\text{уд.техн}} \cdot \Pi_0 + W_{\text{общ}}}{W_{\text{уд.техн}} \cdot \Pi_0 + W_{\text{общ}} \cdot \frac{J_{\text{ПП}}}{100}} - 1 \right) 100, \% \quad (7)$$

Так как внедрение энергосберегающих мероприятий не производилось, то целевой показатель должен был бы равняться нулю. Из выражения (7) видно, что при неизменном составе оборудования и режим его работы, в условиях изменения производственной программы значения целевого показателя всегда отличаются от нуля. Отметим, что погрешность в определении ЭЭФ с помощью целевого показателя

энергосбережения тем больше, чем больше доля условно-постоянной составляющей затрат в структуре общего расхода ТЭР.

Таким образом, существующие методы оценки энергетической эффективности, основанные на таких показателях как общий или удельный расход ЭЭ на производство продукции и целевой показатель по энергосбережению, не всегда позволяют достоверно оценивать ЭЭФ современных ПП, работающих в условиях часто изменяющейся производственной программы.

### Научная новизна

Для оценки ЭЭФ ПП может быть использована расчетно-статистическая модель удельного расхода ЭЭ от воздействующих факторов.

В условиях изменяющейся производственной программы важно оценивать не только значение удельного расхода ЭЭ, но и расположение точки удельного расхода ЭЭ на кривой  $W_{уд} = f(\Pi)$ . Предложенной характеристикой энергоэффективности ПП является тангенс угла  $\text{tg}(\delta)$  касательной к кривой  $W_{уд} = f(\Pi)$ , проведенной через точку соответствующую текущему объему производства (рис. 6).

Определить значение  $\text{tg}(\delta)$  можно из выражения:

$$\text{tg}(\delta) = \frac{W_{\text{общ}}}{\Pi^2}. \quad (8)$$

Физический смысл  $\text{tg}(\delta)$  заключается в том, что он отражает скорость изменения удельного расхода ЭЭ при заданном значении объема производства. Значение  $\text{tg}(\delta)$  показывает, на сколько процентов уменьшится удельный расход ЭЭ, при увеличении объемов производства на 1 %.

Отметим, что значение  $\text{tg}(\delta)$  характеризует влияние условно-постоянной составляющей расхода ЭЭ на значение общезаводского удельного расхода ЭЭ: при больших объемах выпуска продукции удельный вес условно-постоянной составляющей расхода ЭЭ в общезаводском удельном расходе будет снижаться, а значение общезаводского удельного расхода ЭЭ будет стремиться к значению удельного технологического расхода.

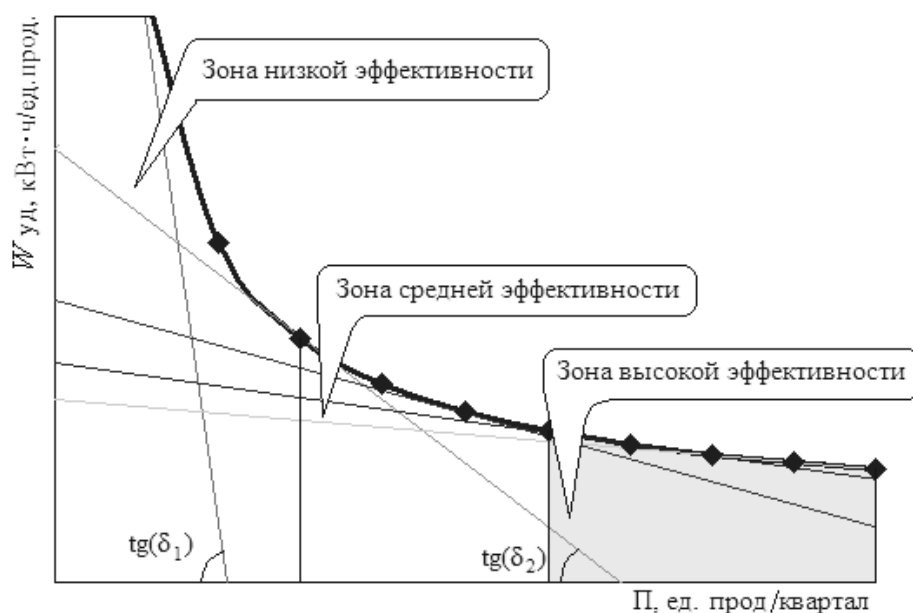


Рис. 6. Зоны энергетической эффективности по загрузке оборудования

Из рис. 6 видно, что с увеличением объема производства угол наклона касательной к кривой  $W_{уд} = f(\Pi)$  уменьшается, соответственно уменьшается и значение  $\text{tg}(\delta)$ . В зависимости от диапазона изменения значений  $\text{tg}(\delta)$  предложено выделить три области загрузки технологического оборудования: зона высокой, низкой, и средней эффективности загрузки оборудования.

Рассмотрим два предприятия с одинаковыми значениями удельного технологического расхода ЭЭ на производство продукции и разными значениями условно-постоянной составляющей общезаводского расхода ЭЭ (рис. 7). Кривая 1 соответствует ПП со значительной долей условно постоянного электропотребления, а кривая 2, соответственно, ПП с низкой долей условно-постоянной составляющей расхода ЭЭ в общезаводском расходе ЭЭ. Значение  $\text{tg}(\delta)$ , соответствующее 30-процентной загрузке обоих предприятий показывает, что в условиях низкой загрузки технологического оборудования снижается эффективность работы ПП<sub>1</sub> и увеличивается общезаводский удельный расход ЭЭ. Для ПП<sub>2</sub> снижение загрузки оборудования незначительно сказывается на энергетической эффективности и практически не отражается на общезаводском удельном расходе ЭЭ. Таким образом,  $\text{tg}(\delta)$  позволяет оценивать ЭЭФ загрузки технологического оборудования.

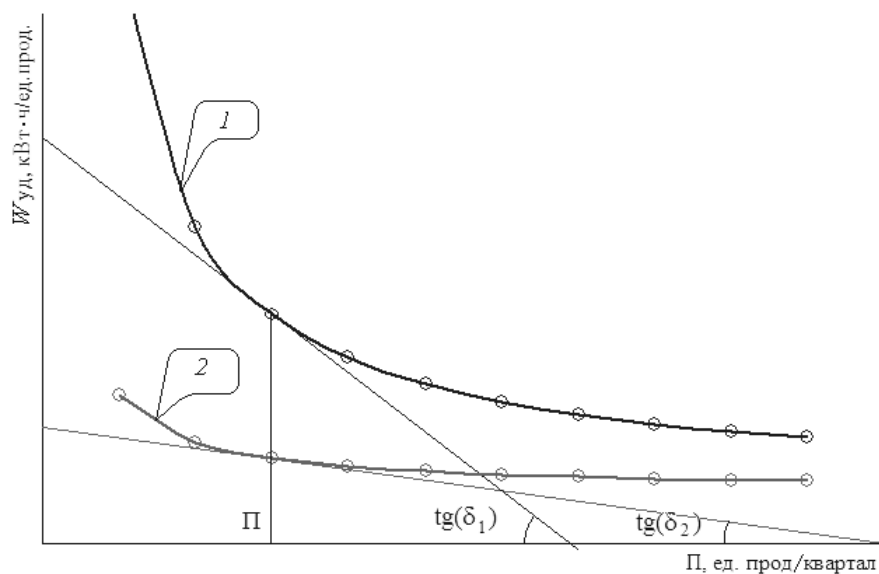


Рис. 7. Изменение угла наклона касательной к кривой  $W_{уд} = f(\Pi)$  при изменении условно постоянной составляющей электропотребления

Выделенные зоны энергетической эффективности (рис. 6), позволяют не только оценивать эффективность использования ЭЭ, но и выявлять приоритетные направления улучшения показателей ЭЭФ.

*Зона низкой эффективности* характеризуется низкой загрузкой технологического оборудования и, как следствие, значительными изменениями удельного расхода ЭЭ при незначительных изменениях объема производства продукции. Для предприятий, работающих в этой зоне повышение энергоэффективности может быть достигнуто, в первую очередь, за счет мероприятий, направленных на снижение постоянной составляющей расхода ЭЭ ( $W_{общ}$ ).

*Зона средней эффективности* соответствует средним загрузкам технологического оборудования. В этой области одинаково эффективны как мероприятия по снижению  $W_{общ}$ , так и мероприятия, направленные на снижение технологического расхода ЭЭ ( $W_{уд.техн}$ ).

Зона высокой эффективности характеризуется незначительными изменениями удельного расхода энергоресурсов, при значительных изменениях объемов производства продукции. В этой области уменьшение  $W_{\text{общ}}$  не оказывает влияния на удельный расход ЭЭ, а для уменьшения удельного расхода необходимо внедрение мероприятий по снижению  $W_{\text{уд.техн}}$ , что, как правило, требует замены либо модернизации технологического оборудования и, соответственно, значительных капитальных затрат.

Таким образом, на основании показателя  $\text{tg}(\delta)$ , можно судить о приоритетных направлениях повышения энергоэффективности ПП:

**Приоритетные направления повышения энергоэффективности  
при различных значениях  $\text{tg}(\delta)$**

Зона ЭЭФ	$\text{tg}(\delta)$	Приоритетные мероприятия для повышения энергоэффективности
Низкая	более 2,5	Снижение общезаводской составляющей энергозатрат
Средняя	2,5–0,68	Снижение общезаводской составляющей энергозатрат, технологические энергосберегающие мероприятия
Высокая	менее 0,68	Технологические энергосберегающие мероприятия

В зависимости от соотношения условно постоянного и удельного технологического электропотребления для различных ПП ширина зон энергетической эффективности может изменяться. Возможно такое соотношение, при котором зона высокой эффективности будет находиться в области, превышающей 100%-ную загрузку технологического оборудования, что фактически недостижимо.

Предложено выражение, позволяющее оценить относительное изменение общезаводского удельного расхода ЭЭ при дозагрузке технологического оборудования до 100%-ной производительности:

$$\Delta = \frac{W_{\text{общ}}}{W_{\text{уд.техн}} \cdot \Pi_{100} + W_{\text{общ}}} \left( \frac{\Pi_{100}}{\Pi_i} - 1 \right) 100 \% , \quad (9)$$

где  $\Pi_{100}$  – объем производства, соответствующий 100%-ной загрузке технологического оборудования;  $\Pi_i$  – текущий объем производства продукции.

В условиях постоянно изменяющейся производственной программы, когда удельные расходы на выпуск продукции варьируются в широких пределах, необходима методология, позволяющая достоверно определять значения удельного технологического потребления ТЭР на выпуск продукции и общезаводских расходов, а также определять приоритетные направления энергосбережения.

Концепция энергосбережения для ПП должна базироваться на трех ключевых моментах:

- работа потребителя с максимальной технологической загрузкой, что обеспечит минимальный удельный расход ТЭР;
- снижение условно постоянной части затрат ТЭР за счет организационно-технических мероприятий;
- снижение технологической составляющей затрат ТЭР за счет модернизации или реконструкции технологии.

На рис. 8 показаны пути улучшения показателя ЭЭФ для ПП. Кривая 1 соответствует зависимости  $W_{\text{уд}} = f(\Pi)$ , соответствующая существующему технологическому процессу и структуре электропотребления предприятия. Кривая 2 соответствует



снижению условно-постоянной составляющей электропотребления. Кривая 3 соответствует максимальной ЭЭФ работы предприятия, которая достигается за счет снижения как условно-постоянной составляющей электропотребления, так и замене либо модернизации технологического оборудования.

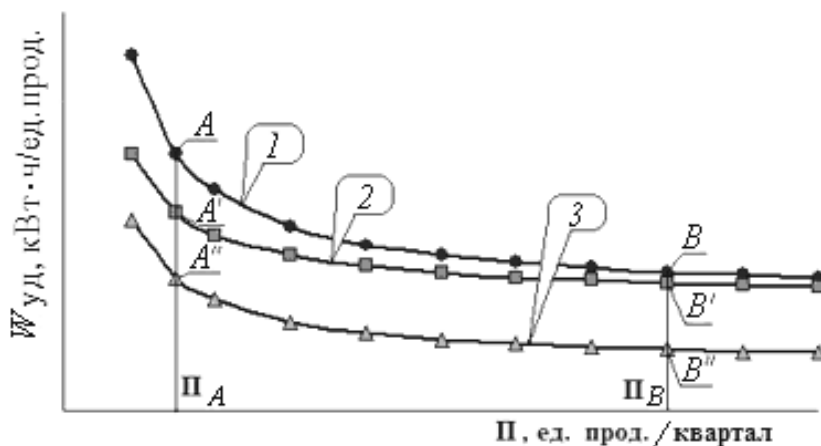


Рис. 8. Пути улучшения показателя ЭЭФ ПП

Переход из точки A (низкой ЭЭФ) к точке B'' (высокой ЭЭФ), возможен тремя способами.

*Первый способ.* ПП работает с низкой загрузкой технологического оборудования  $\Pi_A$ , не имеет возможности наращивать объемы производства продукции. Снижение удельного расхода возможно при внедрении энергосберегающих мероприятий, направленных на снижение условно-постоянной части электропотребления (переход из точки A в точку A'). При переходе в точку A' снижается энергетическая составляющая затрат в структуре себестоимости продукции. Этот фактор может быть определяющим для повышения конкурентоспособности продукции и соответствующего наращивания объемов производства (переход от точки A' к точке B'). Дальнейшее повышение показателя ЭЭФ возможно при модернизации либо замене технологического оборудования (переход от точки B' к точке B'').

*Второй способ.* При переходе из точки A в точку A' невозможно дальнейшее наращивание объемов производства. Улучшение показателя ЭЭФ возможно за счет изменения технологического процесса, что приведет к переходу в точку A''. Дальнейшее улучшение ЭЭФ (точка B) возможно при наращивании объемов выпуска продукции.

*Третий способ.* При увеличении объемов выпуска продукции происходит переход из точки A в точку B''. Достижение минимального значения удельного расхода ЭЭ (точка B) возможно при уменьшении условно постоянной составляющей электропотребления (точка B'), а также при замене либо модернизации технологического оборудования (точка B).

Таким образом, с помощью расчетно-статистических моделей зависимости удельного расхода ЭЭ от объема произведенной продукции возможно повышение достоверности оценки удельных расходов ЭЭ при изменяющейся производственной программы, а также оценка ЭЭФ ПП, которая может быть улучшена за счет увеличения загрузки работы технологического оборудования, снижения условно-постоянной составляющей затрат ЭЭ, замены либо модернизации технологического оборудования.

**Выводы**

1. Произведен анализ существующих показателей энергетической эффективности промышленных потребителей, выявлены их недостатки, обусловленные частыми изменениями производственной программы.

2. Для оценки энергетической эффективности промышленных потребителей может быть использована расчетно-статистическая модель удельного расхода ЭЭ от воздействующих факторов. Это позволяет оценить не только текущее значение общезаводского удельного расхода ЭЭ, но и эффективность загрузки технологического оборудования с помощью тангенса угла наклона касательной к точке, соответствующей текущему объему производства  $\text{tg}(\delta)$ .

3. С использованием расчетно-статистической модели выделены три зоны энергетической эффективности по загрузке технологического оборудования: зона высокой, средней и низкой эффективности.

4. Для каждой из зон энергетической эффективности определены приоритетные направления ее повышения.

5. Предложено выражение, позволяющее оценивать относительное изменение общезаводского удельного расхода ЭЭ при дозагрузке технологического оборудования до 100 % производительности.

**Литература**

1. Закон Республики Беларусь «Об энергосбережении» // Энергоэффективность. – 1998. – № 7. – С. 2–5.
2. Токочакова, Н. В. Расчетно-статистические модели режимов потребления электроэнергии как основа нормирования и оценки энергетической эффективности / Н. В. Токочакова, Д. Р. Мороз // Энергоэффективность. – 2006. – № 1. – С. 14–15 ; 2006. – № 2. – С. 14–15.
3. Токочакова, Н. В. Выявление потенциала энергоэффективности с помощью расчетно-статистических моделей режимов электропотребления / Н. В. Токочакова, Д. Р. Мороз, А. С. Фиков // сб. тезисов выступлений V МНТК молодых специалистов «Металл-2005». – С. 67–69.

*Получено 16.06.2006 г.*