

УДК 676.2

***В.Г. Лисиенко, А.И. Бабин, В.А. Лискин,
С.Г. Овчинников, Е.И. Дукки***

Лисиенко Владимир Георгиевич родился в 1933 г., окончил в 1956 г. Уральский политехнический институт, доктор технических наук, профессор, действительный член Академии инженерных наук и Международной энергетической академии, Союза научных и инженерных обществ, вице-президент Академии инженерных наук РФ, президент Регионального уральского отделения АИН РФ, заслуженный деятель науки и техники РФ, заведующий кафедрой автоматизации и управления в технических системах Уральского государственного технического университета. Имеет более 600 печатных трудов в области математического моделирования, управления и совершенствования высокотемпературных энерготехнологических процессов, энергосбережения и экологии.



Лискин Виктор Александрович родился в 1978 г., окончил в 2000 г. Уральскую государственную лесотехническую академию, аспирант УГЛТА.



Дукки Евгений Иванович родился в 1946 г., окончил в 1971 г. Соликамский целлюлозно-бумажный техникум, главный энергетик АО «Соликамскбумпром».



МЕТОДИКА ПОЛНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТОПЛИВНЫХ ЧИСЕЛ В ПРОИЗВОДСТВЕ БУМАГИ

Предложен метод энергетического анализа с использованием технологических топливных чисел.

производство бумаги, энергозатраты, анализ, топливные числа.

Отличительной особенностью ЦБП является высокая энергоемкость, что ощутимо отражается на себестоимость продукции.

В этой связи перед отраслью стоит проблема рационального использования энергии и энергосбережение. При этом важным инструментом анализа энерготехнологических процессов служит методика расчета сквозных энергетических затрат в форме технологических топливных чисел (ТТЧ), рассмотренная ранее [1, 2]. Эта методика позволяет свести расход всех энергетических носителей к единому универсальному показателю энергоемкости – ТТЧ, который учитывает все материальные и энергетические потоки про-

изводства, раскрывает структуру потребления энергии и материалов с выявлением лимитирующих звеньев по величине максимального энергопотребления.

Данный показатель рекомендовано рассчитывать по формуле

$$ТТЧ = Э_1 + Э_2 + Э_3 - Э_4, \quad (1)$$

где $Э_1$, $Э_2$, $Э_3$, $Э_4$ – первичная энергия, энергия производственных энергоносителей, скрытая энергия, энергия вторичных ресурсов, кг условного топлива/ед. продукции.

Первичная энергия включает в себя химическое тепло топлива, равное при принятой системе единиц удельному расходу топлива B_T (кг у.т./ед. продукции), а также технологические топливные числа добычи, подготовки и транспортировки топлива:

$$Э_1 = B_T + ТТЧ_{\text{под}} + ТТЧ_{\text{доб}} + ТТЧ_{\text{тр}}. \quad (2)$$

Таким образом, величина первичной энергии больше, чем химическая энергия топлива. Например, затраты энергии на добычу, транспортировку и подготовку могут составлять соответственно до 2, 10 и 1 ... 2 % от химической энергии топлива.

Каждая форма энергозатрат определяется следующим образом:

$$Э_i = \sum ТТЧ_i \varphi_i, \quad (3)$$

где $ТТЧ_i$ – технологическое топливное число i -го энергоносителя, кг у.т./ед. энергоносителя;

φ_i – удельный расход соответствующего энергоносителя, ед. энергоносителя/ед. продукции.

Наибольшей величиной в затратах энергии на получение производственных теплоносителей является, как правило, расход первичной энергии. При расчете величины $Э_2$ по (3) все расходы теплоносителей списывают на так называемую «отпущенную энергию», т.е. из произведенной энергии вычитают расходы на собственные нужды, потери в сетях, утечки и т.д.

При расчете скрытой энергии $Э_3$ необходимо учитывать $ТТЧ$ сырьевых материалов в соответствии с их расходными коэффициентами ($ТТЧ_M$), инструмента также в соответствии с расходными коэффициентами ($ТТЧ_I$), оборудования и капитальных сооружений в соответствии с нормативным коэффициентом амортизации ($ТТЧ_{об.с}$), ремонтов с учетом межремонтных сроков ($ТТЧ_{рем}$), транспортных перевозок ($ТТЧ_{тр}$) и других вспомогательных расходов энергии ($ТТЧ_{вс}$), т.е.

$$Э_3 = ТТЧ_M + ТТЧ_I + ТТЧ_{об.с} + ТТЧ_{рем} + ТТЧ_{тр} + ТТЧ_{вс}. \quad (4)$$

Энергия вторичных энергоресурсов $Э_4$ складывается из фактически сэкономленных энергозатрат при использовании топливных $Э_{хим}$, тепловых $Э_{теп}$ и материальных $Э_{мат}$ ресурсов:

$$Э_4 = Э_{хим} + Э_{теп} + Э_{мат}. \quad (5)$$

При этом учитывается сумма химической энергии вторично используемых топлив, а также сумма технологических топливных чисел тепловой энергии (пара), материальных ресурсов на том переделе, на котором заменяются первичные ресурсы с учетом коэффициентов использования вторичных ресурсов.

Такой наглядный алгоритм расчета и базирующийся на нем анализ дают возможность достаточно объективно оценить наиболее энергоемкие звенья в технологических процессах и определить пути рационального использования топливно-энергетических ресурсов.

Исходя из этой структурированной методики, получена обобщенная формула для расчета $ТТЧ$ продукции, которая наглядно раскрывает основные факторы, определяющие величину $ТТЧ$ продукта, произведенного за n технологических операций при наличии p компонентов в ней.

Эта обобщенная формула для $ТТЧ$ продукции имеет следующий вид:

$$ТТЧ = \sum_{i=1}^n \sum_{\varepsilon=1}^p \frac{\Delta q_{i\varepsilon}}{\eta_{i\varepsilon}} \psi_{i\varepsilon}, \quad (6)$$

где $\Delta q_{i\varepsilon}$ – удельная полезная теплота для i -й операции и ε -й компоненты в данной операции, кг у.т./ед. энергоносителя;

$\eta_{i\varepsilon}$ – соответствующий топливно-энергетический КПД;

$\psi_{i\varepsilon}$ – обобщенный расходный коэффициент, определяемый как произведение элементарных коэффициентов $\varphi_{i\varepsilon}$ при изменении i от 1 до n , составляющих последовательную цепочку (при этом в каждой i -й операции номер параллельного звена ε выбирается именно для последовательно включенных звеньев во всей цепочке), ед. энергоносителя/т продукта.

Таким образом, обобщенный расходный коэффициент вычисляют по формуле

$$\psi_{i\varepsilon} = \varphi_{1\varepsilon} \dots \varphi_{i\varepsilon} \dots \varphi_{n\varepsilon}. \quad (7)$$

Отношение

$$b_{i\varepsilon} = \frac{\Delta q_{i\varepsilon}}{\eta_{i\varepsilon}} \quad (8)$$

называют утилизационным удельным расходом энергии в обобщенном виде.

Отношение

$$f_{i\varepsilon} = \frac{\varphi_{i\varepsilon}}{\eta_{i\varepsilon}} \quad (9)$$

в (6) может быть названо расходно-энергетическим коэффициентом на каждом звене технологической цепочки. Оно демонстрирует одновременно действие двух факторов – расходного коэффициента $\varphi_{i\varepsilon}$ и топливно-энергетического КПД $\eta_{i\varepsilon}$. Чем выше значение $f_{i\varepsilon}$, тем при данной величине удельной полезной теплоты $\Delta q_{i\varepsilon}$ больше локальный удельный расход условного топлива b_{φ} для данного звена $i\varepsilon$:

$$b_{\varphi} = \Delta q_{i\varepsilon} f_{i\varepsilon}. \quad (10)$$

Величина

$$b_i = \frac{\Delta q_{i\varepsilon}}{\eta_{i\varepsilon}} \psi_{i\varepsilon} \quad (11)$$

представляет собой обобщенный удельный расход энергии, определяющий вклад i -й операции в $ТТЧ$ конечной продукции. Из (6) наглядно видно, что

при определении *ТТЧ* технологической цепочки, состоящей из *n* последовательных звеньев, происходит двойное суммирование величин как по технологическим цепочкам *i* от 1 до *n* (последовательное включение звеньев), так и по числу компонентов технологического процесса внутри каждого звена ϵ от 1 до ρ (параллельное включение компонентов).

Как видно, важнейшими факторами, определяющими величину *ТТЧ*, являются удельная полезная теплота Δq , необходимая для протекания процесса, топливно-энергетический КПД η и обобщенные расходные коэффициенты ψ . Снижение Δq и ψ и увеличение η приводят к уменьшению *ТТЧ* продукции.

Использование технологических топливных чисел в их иерархической последовательности позволяет выявлять те узловые области технологической цепи, где расход энергии резко увеличивается и содержатся основные резервы по ее экономии, а также объективно анализировать, какие энергосберегающие мероприятия отдельных технологических переделов (операций) приводят в конечном счете к понижению энергоемкости национального дохода, а какие – к противоположному результату.

Рассмотрим пример применения данного метода энергетического анализа при производстве бумаги на АО «Соликамскбумпром».

На целлюлозно-бумажное предприятие заготовленная в лесу древесина поступает со своим топливно-технологическим числом, в которое входят затраты на валку, обрезку сучьев и транспортировку древесины до предприятия.

Поступившая на предприятие древесина разделяется на два потока: один идет на производство окоренного баланса для древесно-дефибрерной массы (ДДМ), а другой – на производство технологической щепы для сульфитной целлюлозы (СФИ) и термомеханической массы (ТММ).

Помимо материальных потоков (ДДМ, СФИ, ТММ), в каждом переделе участвуют также дополнительные материальные потоки (химикаты) и сами топливные энергоносители (электроэнергия, пар, вода, воздух и т.д.).

Каждый материальный и энергетический поток в любом переделе имеет свои *ТТЧ*, коэффициент полезного действия и расходный коэффициент. Расходный коэффициент показывает, сколько данного вида энергоносителя было затрачено в данном технологическом переделе.

Полученные в процессе производства материальные потоки поступают на бумажное производство, где они смешиваются в машинном бассейне. Полученная в результате смешивания бумажная масса при взаимодействии с различного вида энергоносителями идет на производство газетной бумаги в бумагоделательной машине.

Технологический процесс разделен на переделы в соответствии со структурной схемой расщепления технологической цепочки (см. рисунок).

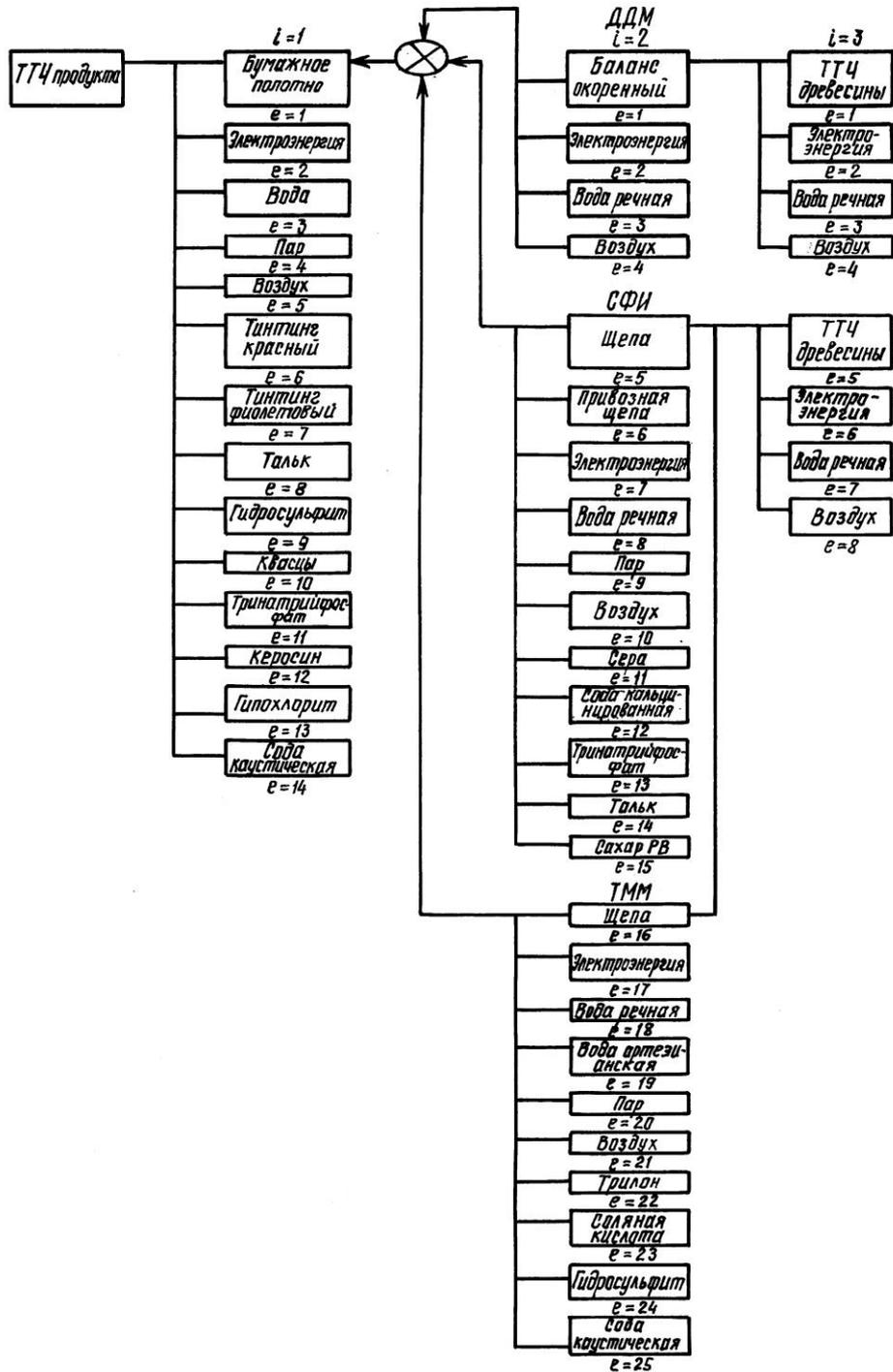


Схема расщепления технологической цепочки производства бумаги

Процесс производства бумаги разделен на три технологических звена: 1 – производство бумаги в бумагоделательной машине; 2 – производство составляющих бумажной массы; 3 – производство щепы, окоренного баланса. Значения удельных полезных затрат теплоты, термических и энергетических кпд, расходных коэффициентов приняты по [1–4]. В соответствии с рисунком производится расчет $ТТЧ$ бумаги по формуле (11). Результаты расчета занесены в табл. 1.

Полученный готовый продукт (бумага) имеет после всех технологических переделов свое $ТТЧ$.

Из произведенного расчета имеем: $ТТЧ$ бумаги – 921,049 кг у.т./т; удельная полезная теплота $q_{\Sigma} = 287,143$ кг у.т./т; эндонергетический кпд $\eta_{\text{э}} = 0,312$.

Энергетические затраты на производство целлюлозно-бумажной продукции весьма значительны и составляют в среднем 10 ... 12 % цеховой себестоимости, однако этим влияние системы энергосбережения и эффективность производства не ограничиваются. Надежность энергосбережения, стабильность параметров энергоносителей существенно влияют на качество продукции.

Самым энергоемким является передел производства бумаги, наибольший вклад в энергетические затраты вносят энергоносители: электроэнергия и воздух. Основные резервы экономии заключены на переделах ТММ, СФИ, производства бумаги. Таким образом, из расчета видно, что именно на этих переделах скрываются наиболее ощутимые резервы снижения $ТТЧ$. Небольшая величина кпд $\eta_{\text{э}} = 0,312$ объясняется широким использованием энергоносителей с низким кпд. Рекордсменом по вкладу в $ТТЧ$ продукта является электроэнергия. Экономия, прежде всего, этого энергоносителя вносит ощутимый вклад в снижение энергозатрат.

Более рациональному использованию топливно-энергетических ресурсов будет способствовать энергетический анализ, основанный на расчетах сквозных затрат по всем технологическим цепям – $ТТЧ$ в их определенной иерархической последовательности. Технологические топливные числа целесообразно применять при экономическом анализе наряду с себестоимостью, удельными капитальными затратами, окупаемостью, фондоотдачей, прибылью и экологическими факторами.

Для повышения эффективности энергосбережения существенным представляется совершенствование учета энергетических затрат в производстве. В настоящее время учет и нормирование расхода топливно-энергетических ресурсов на производство продукции в отрасли осуществляется по технологическим стадиям производства – переделам. Предлагаемый переход к оценке энергоемкости конечной продукции позволяет оптимизировать технологию получения этой продукции по критерию минимальных энергетических затрат на ее производство, оценивать сырье и полуфабрикаты по энергетическим затратам на их переработку, что, в свою очередь, дает

Расчет энергозатрат на производство бумаги по технологическим пределам

Энерго-потребитель	Размерность	Δq_{iE} , кг у.т./ед.	η_{iE}	φ_{iE} ед./т	b_{iE} , кг у.т./т	f_{iE} , ед./т	b_o , кг у.т./т	ψ_{iE} , ед./т	b_r , кг у.т./т	$\Delta q_{iE} \cdot \psi_{iE}$, кг у.т./ед.
Бумага										
ТММ	т	0,743	0,937	0,290	0,793	0,309	0,230	0,290	0,230	0,215
СФИ	т	0,681	0,937	0,249	0,727	0,266	0,154	0,249	0,181	0,170
ДДМ	т	1,411	0,937	0,516	1,506	0,551	0,777	0,516	0,777	0,728
Электроэнергия	МВт · ч	122,7	0,32	0,590	383,437	1,844	226,259	0,590	226,228	72,393
Воздух	тыс. м ³	9,45	0,32	7,881	29,531	24,628	232,735	7,881	232,734	74,475
Вода	м ³	0,038	0,32	24,8	0,120	77,500	2,945	24,8	2,976	0,924
Пар	ГДж	34,18	0,75	0,502	45,573	0,669	22,866	0,502	22,878	17,158
Химикаты	т	–	–	0,094	37,53	–	–	0,094	3,528	–
ТММ										
Щепа	м ³	–	–	3,11	1,35	–	–	0,902	1,218	–
Вода речная	м ³	0,038	0,32	12,97	0,120	40,531	1,540	3,761	0,451	0,143
Вода артезианская	м ³	0,038	0,32	4	0,120	12,500	0,475	1,160	0,139	0,044
Электроэнергия	МВт · ч	122,7	0,32	2,480	383,437	7,750	950,925	0,719	275,691	88,221
Пар	ГДж	34,18	0,75	0,067	45,573	0,089	3,042	0,019	0,866	0,649
Воздух	тыс. м ³	9,45	0,32	0,251	29,531	0,784	7,401	0,073	2,156	0,690
Химикаты	т	–	–	0,009	37,53	–	–	0,003	0,113	–
СФИ										
Щепа	м ³	–	–	4,613	1,35	–	–	1,149	1,551	–
Привозная щепа	м ³	–	–	0,067	1,35	–	–	0,017	0,023	–
Электроэнергия	МВт · ч	122,7	0,32	0,270	383,437	0,844	103,559	0,067	25,690	8,221
Вода речная	м ³	0,038	0,32	106,55	0,120	332,969	12,653	26,531	3,184	1,008
Пар	ГДж	34,18	0,75	0,275	45,573	0,367	12,544	0,068	3,099	2,324
Воздух	тыс. м ³	9,45	0,32	0,186	29,531	0,581	5,490	0,046	1,358	0,435
Химикаты	т	–	–	0,408	37,53	–	–	0,102	3,828	–

Продолжение табл.

Энерго-потребитель	Размерность	$\Delta q_{i\text{в}}$, кг у.т./ед.	$\eta_{i\text{в}}$	$\varphi_{i\text{в}}$, ед./т	$b_{i\text{в}}$, кг у.т./т	$f_{i\text{в}}$, ед./т	$b_{\text{о}}$, кг у.т./т	$\psi_{i\text{в}}$, ед./т	$b_{\text{т}}$, кг у.т./т	$\Delta q_{i\text{в}} \cdot \psi_{i\text{в}}$, кг у.т./ед.
ДДМ										
Баланс окоренный	м ³	–	–	2,57	1,35	–	–	1,326	1,790	–
Электроэнергия	МВт · ч	122,7	0,32	0,152	383,437	0,475	58,282	0,078	29,908	9,571
Вода речная	м ³	0,038	0,32	6,5	0,120	20,312	0,772	3,354	0,402	0,127
Воздух	тыс. м ³	9,45	0,32	0,095	29,531	0,297	2,807	0,049	1,497	0,463
Баланс окоренный										
Древесина	м ³	–	–	1,016	1,35	–	–	1,347	1,818	–
Электроэнергия	МВт · ч	122,7	0,32	0,014	383,437	0,044	5,399	0,019	7,285	2,331
Вода речная	м ³	0,038	0,32	1,46	0,120	4,563	0,173	1,936	0,232	0,074
Воздух	тыс. м ³	9,45	0,32	0,095	29,531	0,297	2,807	0,126	3,721	1,191
Щепа										
Древесина	м ³	–	–	1,036	1,35	–	–	2,125	2,869	–
Электроэнергия	МВт · ч	122,7	0,32	0,016	383,437	0,050	6,135	0,033	12,653	4,049
Вода речная	м ³	0,038	0,32	1,46	0,120	4,563	0,173	2,994	0,359	0,114
Воздух	тыс. м ³	9,45	0,32	0,095	29,531	0,297	2,807	0,195	5,759	1,843
ВЭР	кг у.т./т	–	–	–	–	–	–	–	43,857	–

возможность исходя из энергоемкости производства конечной продукции формировать композицию бумаги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисиенко В.Г., Дружинина О.Г., Зайнулин Л.А. Программное обеспечение для энергоанализа энерготехнологических процессов как элемент экспертной системы // Энергетика. – 1998. – № 2. – С. 3–10.
2. Лисиенко В.Г., Розин С.Е., Щелоков Я.М. Методика расчета и использования технологических топливных чисел // Черная металлургия. – 1987. – № 2. – С. 108–112. – (Изв. высш. учеб. заведений).
3. Слуцкий А.В. Экономика энергосбережения в целлюлозно-бумажной промышленности. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 160 с.
4. Технологический регламент производства ЦБК г. Соликамска (книга 1). – 1982. – 600 с.

Уральский государственный
политехнический университет

Уральская государственная
лесотехническая академия

АО «Соликамскбумпром»

Поступила 30.10. 2000 г.

V.G. Lisienko, A.I. Babin, V.A. Liskin, S.G. Ovchinnikov, E.I. Dukki
**Technique of Complete Energy Analysis and Calculation
of Technological Fuel Values in Paper Production**

Technique of energy analysis is suggested using technological fuel values.
