

ЭКОНОМИКА*Л.А. Хандоэжко***МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКТОР ЭНЕРГО-
И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ РОССИИ***L.A. Khandozhko***THE METEOROLOGICAL FACTOR IN RESOURCE
AND ENERGY SAVING IN HEAT POWER INDUSTRY OF RUSSIA**

В статье рассматриваются современные аспекты погодозависимости теплоэнергетики с позиций оптимального использования прогнозов температуры воздуха, разработки эффективного регламента выбора решений и энерго- и ресурсосбережения. Приводится функциональное представление оценки метеорологического фактора в возможном процессе избыточного и недостаточного теплоснабжения. Дается достаточно обширная информация об экономической полезности метеорологических прогнозов по территории России и их энергосберегающего эффекта.

The paper discusses modern aspects in weather dependence of the heat power industry as viewed from the standpoint of optimum use of air temperature forecasts and development of the effective regime for decision making and resource and energy saving. Functional presentation of assessment of the meteorological factor under possible conditions of excessive and deficient heat supply is given. Fairly extensive information on economic value of meteorological forecasts and their energy saving effect across the territory of Russia is given.

Введение

Использование обществом природных ресурсов – это естественная потребность, обеспечивающая текущие и будущие жизненные интересы. Вся окружающая природная среда, включая и атмосферу, несет ресурсную нагрузку. Многообразная созидательная деятельность производства возможна не только благодаря использованию вещественных ресурсов, типа углеводородных, но и информационных – такого рода ресурсов как погода-климатические. Это не только достаточно известное [1–5, 14–18] аксиоматическое утверждение неизбежности не просто опытной подстройки к возможной погоде, как упрощенной системы обеспечения безопасности, но и необходимости оптимальной погодохозяйственной адаптации потребителя в режиме оперативного времени.

Универсальность и даже *уникальность* метеорологической информации, а прогнозов погоды в особенности, состоит в ее масштабности охвата отраслей

экономики, повседневности ее реализации, но главное в том, что она в процессе специализированного использования *материализуется в ценности данного вида производства.*

Энергетика как важнейшая инфраструктура экономики находится в постоянной зависимости от гидрометеорологических условий [3, 4, 8, 14, 17]. Это особенно относится к теплоэнергетике. В условиях экономического обновления строительной индустрии теплоэнергетике как и электроэнергетике отводится ведущая роль стабилизирующего фактора устойчивого социально-экономического развития России.

Многообразие *отраслевого энергопотребления* при известной постоянной зависимости энергоисточников от действий погоды требует научного подхода к оценке метеорологических потерь, в том числе и в теплоэнергетике, и разработке механизма оперативного энерго- и ресурсосбережения.

В данной работе представлены результаты многолетних исследований автора в решении этой проблемы.

Мотивация энерго- и ресурсосбережения

Энергетика как одна из ведущих отраслей жизнеобеспечения охватывает все без исключения инфраструктурные составляющие в экономической и социальной сферах страны. Это, в сущности, гигантская работа топливно-энергетического комплекса, обеспечивающего получение, передачу и преобразование различных видов энергии и энергетических ресурсов в целях устойчивой динамики экономического развития [3, 6, 7, 11, 13, 17].

Из всех систем энергетики особое значение придается теплоэнергетике, использующей такие топливные ресурсы как нефть (мазут) и природный газ. Общеизвестно, что углеводородное топливо, как вещественный ресурс, по своей природе исчерпаем. В условиях заметного роста строительной индустрии и экономики в целом развивающаяся теплоэнергетика постоянно наращивает потребление углеводородных ресурсов. Неизбежно, при этом, растут и тепловые потери как в процессе выработки тепловой энергии, так и на тепловых сетях.

Развитие теплоснабжения в России ориентировано преимущественно на централизованное регулирование отпуска тепла, основными источниками которого являются ТЭЦ, ТЭС, ГРЭС, АЭС, ГеоЭС, осуществляющие свою работу в системе территориальных генерирующих компаний (ТГК). Энергораспределительные сети остаются под управлением государства. Централизованное теплоснабжение в этой системе энергетики остается крупнейшим потребителем органического топлива.

Второе место по мощности производимого тепла принадлежит муниципальным котельным (мини-ТЭЦ) в системе ГУП ТЭК России. В отличие от ТЭЦ, их КПД заметно ниже, а использование метеорологической информации на этих теплоисточниках практически сведено к нулю. В этой системе теплоэнергетики (ГУП ТЭК) при одноуровневном режиме задания тепловой нагрузки

наблюдаются наибольшие потери тепловых ресурсов и тепловой энергии на единицу мощности теплоисточника.

Потери тепла отмечаются на всех ТЭЦ России и это связано не только с дефектами тепловых сетей. Теплоисточники слабо адаптируются к ожидаемым условиям погоды. Это особенно характерно для периодов затяжной теплой погоды, когда они «отапливают городскую атмосферу». Излишки произведенной тепловой энергии не могут быть проданы или аккумулированы. Это прямые незамещенные потери в энергетике страны, исчисляемые миллиардами рублей, затраченных на добычу, транспортировку и хранение углеводородного топлива – природного газа.

В условиях рынка эта область энергообеспечения (ОАО «Энерго») находит компенсирующий механизм в виде оплаты многомиллионным потребителем произведенной тепловой энергии не только за период работы ТЭЦ, а в течение всего года.

Интеграция России в мировую рыночную экономику вызывает настоятельную необходимость соблюдения международных экономических принципов, одним из которых является оптимальное использование топливно-энергетических ресурсов. Значительная доля энергосбережения, включая топливные ресурсы, может быть получена в мегаполисах и других крупных городах России.

В январе 1998 года постановлением Правительства Российской Федерации была утверждена Федеральная программа «Энергосбережение России» на 1998-2005 годы, в которой были определены направления эффективного использования энергетических ресурсов.

В реализацию энергосберегающей стратегии включается не только технический, но и научный потенциал, раскрывающий возможности эффективных технологий энерго- и ресурсосбережения.

Применение программно-технических комплексов, систем диспетчеризации и средств автоматики требуют, прежде всего, оптимизацию учета ожидаемых метеорологических условий [8, 12, 13, 14, 17].

«Транспортировка» теплоносителя в тепловой сети, вытянутой на десятки и сотни километров, требует значительного периода времени. Следовательно, в этой системе централизованного теплоснабжения подстройка теплоисточника к погоде в режиме текущего времени невозможна, а период адаптации определяется в течение 6-, 12- или 24-часового интервала.

Все сказанное дает основание утверждать, что оптимальное использование в системе теплоснабжения метеорологических прогнозов является важнейшим звеном в решении стратегической задачи энерго- и ресурсосбережения и необходимым условием ресурсообеспечения страны в будущем.

Россия проходит этап масштабной реконструкции и модернизации систем теплоснабжения [11, 13]. Внедряются более совершенные автоматизированные системы управления и диспетчеризации.

В решении всего комплекса задач в теплоэнергетике еще слабо прослеживаются исследования НИИ теплофикации такого актива тепло- и ресурсосбережения как *эффективная адаптация под ожидаемую погоду*.

Функция тепловых потерь

Наращивание потребления углеводородного топлива в теплоэнергетике осуществляется как в системе ОАО «Энерго», принадлежащих ТГК, так и в системе государственных предприятий ГУП «ТЭК». К ним предъявляется обязательное требование – сокращение потерь тепловой энергии и повышения экономичности теплоснабжения. Для этого необходимо внедрение современных энергоэффективных технологий.

Нам представляется, что в основу практической реализации таких технологий должно быть положено научное обоснование [14, 15, 17] снижения расхода топлива на производство тепла. В практику диспетчерского управления необходимо внедрение *экономико-метеорологической модели оптимального использования метеорологических прогнозов* [17 – 19]. В нее включаются такие эксплуатационно-экономические показатели как расход тепловой энергии, переменные и текущие затраты и энергетические характеристики теплоисточника [19]. Отсюда очевидно, что разработка модели оптимизации прогнозов в теплоэнергетике требует функционального представления расхода тепловой энергии на основе диспетчерских решений.

В условиях нестабильности температурного режима в отопительные периоды теплоисточники несут как тепловые, так и ресурсные (топливные) издержки. Оптимальное использование метеорологических прогнозов – среднесуточной температуры воздуха (\bar{t}) и скорости ветра (v) – позволяет снизить или вовсе исключить неэффективное использование топливных ресурсов.

Отсюда очевидно, что *энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике* представляется возможным на основе оптимального и экономически выгодного использования метеорологических прогнозов.

Задание режима работы теплоисточника осуществляется, главным образом, на основе прогноза температуры воздуха (t_{np}). Идеальная подстройка теплоисточника к ожидаемой температуре воздуха исключается. Как следствие – отклонения от фактической температуры (t_{ϕ}) возможны в ситуации *избыточного* (при $t_{np} < t_{\phi}$) и *недостаточного* (при $t_{np} > t_{\phi}$) теплоснабжения, отражающие ошибки прогнозирования среднесуточной температуры воздуха ($\Delta \bar{t}_{np}$).

В работах автора [14–18] была показана теоретическая основа разработки *функции тепловых потерь* (Q_n , Q_n). Более общий вид их можно представить так:

$$Q_n = A \exp(-B) - Q_p^T C; \quad (1)$$

$$Q_n = A \exp(-B^*) - Q_p^T C^*, \quad (2)$$

где A – некоторая постоянная, отражающая ошибку расхода тепла; B и B^* – тепловые издержки, обусловленные ошибками прогноза температуры воздуха (Δt_{np}); C и C^* – аналогичные тепловые потери при ошибках прогноза выше некоторого порогового условия.

Первая составляющая отражает экспоненциальный характер распределения тепловых потерь, вторая – линейный. Соответственно, каждая из них позволяет определить тепловые потери при малых и больших ошибках прогнозирования, а значит и ошибках принимаемых диспетчером решений. Пороговое условие $|\Delta t_{np}|$ находится следующим образом:

$$|\Delta t_{np}| \geq 1,8 \sigma_{\Delta Q} \frac{(t_{II} - t_p)}{Q_p^T}. \quad (3)$$

Если $\Delta t_{np} > |\Delta t_{np}|$, расчет величин Q_n и Q_n выполняется по линейным составляющим в (1) и (2):

$$Q_n = -\frac{Q_p^T}{t_{II} - t_p} \Delta t_{np} \quad (4)$$

и

$$Q_n = \frac{Q_p^T}{t_{II} - t_p} \Delta t_{np}, \quad (5)$$

где Q_p^T – тепловая мощность источника (Гкал/час); t_{II} – температура в помещении, принимается равной 18 °С; t_p – расчетная температура – климатический параметр, известный для каждого города [18]; Δt_{np} – ошибки прогноза среднесуточной температуры воздуха.

При малых ошибках $\Delta t_{np} < |\Delta t_{np}|$ тепловые потери определяются по формулам:

$$Q_n = \sigma_{\Delta Q} \tilde{Q}_n[\lambda, \Theta(\Delta t_{np})], \quad (6)$$

$$Q_n = \sigma_{\Delta Q} \tilde{Q}_n[\lambda, \Theta(\Delta t_{np})], \quad (7)$$

где $\sigma_{\Delta Q}$ – среднеквадратичное отклонение расхода тепла $\Delta Q(Q_n, Q_n)$; \tilde{Q}_n и \tilde{Q}_n – функции, табулированные посредством аргументов λ и Θ_{np} , $\lambda = \frac{\Delta Q_0}{\sigma_{\Delta Q}}$ и Θ_{np} – относительная ошибка прогноза [18].

Расчет итоговых значений Q_n и Q_n , согласно (4) – (5) и (6) – (7), выстраивается в алгоритмическую конструкцию, достаточно полно представленную в работах [5, 17, 18].

Функция стоимостных потерь

Далее устанавливается *функция стоимостных потерь*, определяемая формулой:

$$s(\Delta t_{np}) = \Delta \tau (c_n Q_n + c_n Q_n), \quad (8)$$

где $\Delta \tau$ – период времени, на который задается тепловая нагрузка, что соответствует периоду прогнозирования; c_n – себестоимость выработки тепла ТЭЦ (руб./Гкал); c_n – масштаб потерь в экономической и социальной сфере в связи с недодачей тепла потребителям тепловой энергии.

Функция (8) является конечной *функцией потерь* теплоисточника, где диспетчер принимает решение согласно тексту прогноза.

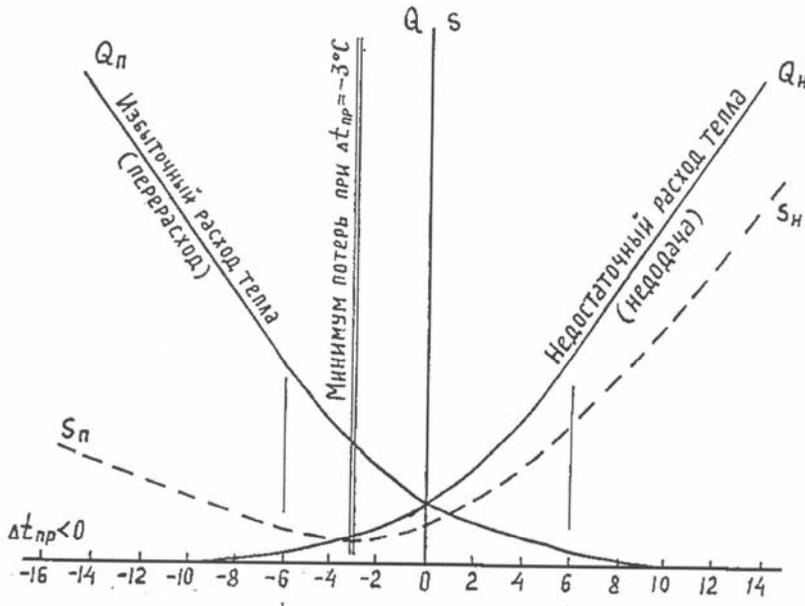
Приведем необходимый для последующих расчетов перечень теплотехнических и метеорологических характеристик:

1. Q_p^T – расчетная тепловая мощность теплоисточника (Гкал/ч), величина, известная для каждой ТЭЦ;
2. $\overline{t' - t''}$ – средняя разность температур прямой t' и обратной t'' воды (теплоносителя) в системе теплоснабжения;
3. δt_g – ошибка измерения температуры воды. Наиболее часто $\delta t_g = 0,5$ или $1,0^\circ \text{C}$;
4. c_n – себестоимость выработки тепла ТЭЦ (руб./Гкал);
5. c_n – масштаб потерь при недодаче тепла в виде штрафных издержек; $c_n = 3-5 C_n$;
6. t_n – температура воздуха внутри отапливаемого помещения; принимается $t_n = 18^\circ \text{C}$;
7. t_p – расчетная температура воздуха [18];
8. $\overline{t_{от}}$ – средняя температура воздуха в данном пункте за отопительный период.

Полный алгоритм расчета функции потерь $s(\Delta t_{np})$ приведен в работе [18]. На рис. 1 дано графическое отображение тепловых и стоимостных потерь.

При задании возможных ошибок прогноза (Δt_{np}) (по согласованию с потребителем) в пределах 2–3 °С функция потерь выстраивается следующим образом (фрагмент применительно к ТЭЦ-2 Ростова-на-Дону, 1998–2001 гг.).

Ошибка прогноза (Δt_{np})										
$\Delta t_{np} = t_{np} - t_{\phi} < 0$					$\Delta t_{np} = t_{np} - t_{\phi} > 0$					
Избыточное теплоснабжение					Недостаточное теплоснабжение					
...	-12	-9	-6	-3	0	3	6	9	12	...
Функция $s(\Delta t_{np})$, тыс.руб. ошибка (прогноз)										
...	48,0	36,1	26,2	21,7	32,8	71,0	119,3	179,7	240,0	...



$\Delta t_{np} < - \frac{1.8\sigma_{\Delta Q}}{Q_p^T} (t_n - t_p)$ $s_n(\Delta t_{np}) = - c_n \Delta \tau \frac{Q_p^T}{t_n - t_p} \Delta t_{np}$	$ \Delta t_{np} \leq \frac{1.8\sigma_{\Delta Q}}{Q_p^T} (t_n - t_p)$ $s'_{п}(\Delta t_{np}) = \sigma_{\Delta Q} \Delta \tau c_{п} \tilde{Q}_{п}(\lambda, \theta)$ $s'_{н}(\Delta t_{np}) = \sigma_{\Delta Q} \Delta \tau c_{н} \tilde{Q}_{н}(\lambda, \theta)$ <p>Здесь берётся сумма $s'_{п}, s'_{н}$</p>	$\Delta t_{np} > \frac{1.8\sigma_{\Delta Q}}{Q_p^T} (t_n - t_p)$ $s'_{н}(\Delta t_{np}) = c_{н} \Delta \tau \frac{Q_p^T}{t_n - t_p} \Delta t_{np}$
---	--	--

Рис. 1. Функции тепловых ($Q_{п}, Q_{н}$) и стоимостных ($s_{п}, s_{н}$) потерь

Приведенная функция потерь позволяет установить соответствующую ей матрицу потерь, отражающую стоимостную величину тепловых потерь при избыточном и недостаточном теплоснабжении (табл. 1).

Таблица 1

Матрица потерь, тыс.руб. (согласно приведенной функции)
прогноз

Φ _i	d (Π _j)									
	...	-17,-15	-14,-12	-11,-9	-8,-6	-5,-3	-2, 0	+1,+3	+4,+6	...
...
-17,-15	...	32,8	71,0	119,3	179,7	240,0
-14,-12	...	21,7	32,8	71,0	119,3	179,7	240,0
-11,-9	...	26,2	21,7	32,8	71,0	119,3	179,7	240,0
-8,-6	...	36,1	26,2	21,7	32,8	71,0	119,3	179,7	240,0	...
-5,-3	...	48,0	36,1	26,2	21,7	32,8	71,0	119,3	179,7	...
-2, 0	48,0	36,1	26,2	21,7	32,8	71,0	119,3	...
+1,+3	48,0	36,1	26,2	21,7	32,8	71,0	...
+4,+6	48,0	36,1	26,2	21,7	32,8	...
...

Выбор оптимальных погодо-хозяйственных решений d_k и оценка средних (байесовских) потерь \bar{R}

Поскольку стратегия доверия многофазовым прогнозам не является оптимальной [1, 20, 21] необходимо разработать регламент задания режима работы ТЭЦ, содержащий действия потребителя [$d(\Pi_j)$], минимизирующие указанные издержки, которые постоянно присутствуют как неизбежные в условиях естественной вариабельности температуры наружного воздуха.

Используя матрицу сопряженности прогнозов $\|n_{ij}\|$ и матрицу потерь $\|s_{ij}\|$ рассчитываются элементы матрицы систематических потерь $\|\bar{R}_{kj}\|$,

$$\bar{R}_{kj} = \sum_{k=1}^{n=m} s_{ik} q_{ij}, \tag{9}$$

где k – номер выбора решения, отвечающего действию d_k ; s_{ik} – элементы матрицы потерь (табл. 1) при меняющемся k ; q_{ij} – элементы матрицы условных вероятностей ($q_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_{0j}}$ – согласно матрице сопряженности прогнозов).

В итоге определяется содержание матрицы систематических потерь, которая, следуя табл. 1 и известной успешности прогнозов, записывается следующим образом (табл. 2).

Таблица 2

Матрица систематических потерь (*тыс.руб.*) при использовании методических прогнозов прогноза

(согласно приведенной матрице потерь), Ростов-на-Дону, ТЭЦ-2, 1998–2001 гг.

Выбор решения (действия) диспетчера ТЭЦ, d_k		Прогноз, Π_j								
		Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5	Π_6	Π_7	Π_8	
		-17,-15	-14,-12	-11,-9	-8,-6	-5,-3	-2, 0	+1,+3	+4,+6	...
Φ_1	-17,-15	21,7	24,0	30,9	38,7	49,4	50,6	74,0	65,6	...
Φ_2	-14,-12	32,8	27,3	28,1	29,5	37,2	41,0	63,1	71,0	...
Φ_3	-11,-9	71,0	36,9	43,5	32,1	29,0	32,1	51,0	59,1	...
Φ_4	-8,-6	119,3	70,2	157,6	49,4	27,0	25,5	39,2	47,5	...
Φ_5	-5,-3	179,7	149,6	112,2	78,6	39,5	24,1	29,8	36,5	...
Φ_6	-2, 0	240,0	179,7	164,3	124,2	72,7	33,4	26,7	32,5	...
Φ_7	+1,+3	300,0	270,0	222,6	179,0	118,2	58,1	37,9	35,5	...
Φ_8	+4,+6	360,0	330,0	282,0	237,9	193,3	95,4	68,7	42,1	...
...

Матрица систематических потерь рассматривается как специализированный (для данной ТЭЦ) регламент выбора оптимальных погодо-хозяйственных решений d_k . Так, в случае прогноза $t_{np} = -14, -12$ °С диспетчер должен ориентироваться на $t_{np}^* = -17, -15$ °С (см. табл. 2), т.е. на снижение температур от -13 до -16 °С. Задание более высокой (на 3 °С) температуры теплоносителя позволяет предотвратить ситуации недостаточного теплоснабжения, а значит исключить или снизить более высокие штрафы «недодачи» тепла относительно потерь «перерасхода» тепла.

Следуя теории выбора оптимальных решений [12, 17, 21] в рамках экономической метеорологии в качестве критерия оптимальности определяются средние (в статистическом смысле) потери, отвечающие байесовскому подходу выбора лучшей модели практической реализации метеорологических прогнозов.

При известной матрице систематических потерь средние потери при стратегии доверия методическим прогнозам и оптимальной стратегии определяются соответственно по формулам:

$$\bar{R}_m = \sum_{j=1}^m p_{0j} \bar{R}_{k=j}(\Pi_j), \tag{10}$$

и
$$\bar{R}_{mo} = \sum_{j=1}^m p_{0j} \min \bar{R}_{kj}(\Pi_j). \tag{11}$$

Оценка средних потерь при возможном использовании инерционных прогнозов есть величина

$$\bar{R}_{ин} = \sum_{j=1}^m p_{0j}^{ин} \bar{R}_{k=j} (II_j)_{ин}, \quad (12)$$

где p_{0j} – вероятности текстов прогнозов, отвечающих ориентации на фактическую погоду.

Теперь представляется возможным выстроить полный алгоритм расчета ресурсосбережения (рис. 2).

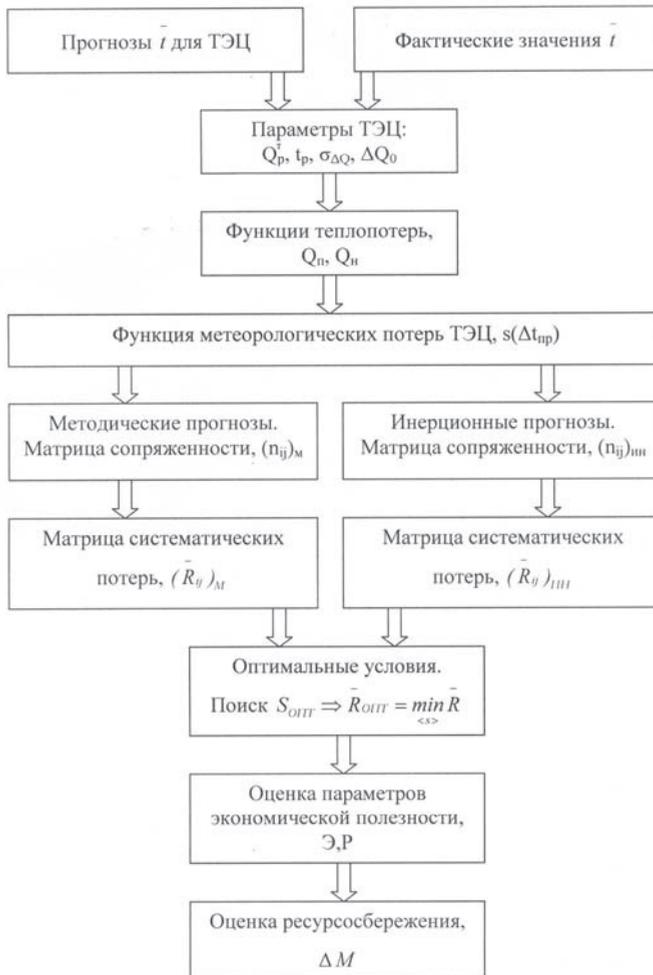


Рис. 2. Алгоритм расчета ресурсосбережения на ТЭЦ

Оценка экономической полезности прогнозов температуры воздуха для ТЭЦ

Исследования, выполненные в работах [5, 14, 15, 16, 18], позволяют рассматривать средние (в статистическом смысле) потери как показатели меры зависимости производственной деятельности даже при использовании прогностических информационных ресурсов. В качестве базовых рассматриваются средние потери при реализации методических прогнозов (10) – (11) в задании тепловой энергии на ТЭЦ. В практике работы теплоэнергетических источников возможна диспетчерская ориентация на текущую погоду, т.е. на инерционные прогнозы.

В сущности, каждый потребитель вправе выбрать тот природный информационный ресурс, который, как ему представляется, может быть практически полезным. Однако реальные изменения погодных условий показывают, что стратегия ориентации потребителя на исходную фактическую погоду сопряжена со значительными метеорологическими рисками и могут быть причиной как избыточного (Q_n), так и недостаточного (Q_n) теплоснабжения со всеми вытекающими социальными и экономическими последствиями.

Отсюда очевидно, что возникает естественная потребность установить насколько же *методические прогнозы* температуры воздуха, как научная продукция, предпочтительнее, экономически результативнее относительно *инерционных прогнозов*, не требующих научного обоснования.

Это аксиоматическое положение, как уже отмечалось в работах [17–19] позволяет записать экономический эффект использования прогнозов следующим образом:

$$\mathcal{E} = \beta N \left[\left(\bar{R}_{ин} - \bar{R}_м \right) - \mathcal{Z}_{ин} \right], \quad (13)$$

где $\beta = 0,7$ – коэффициент долевого участия гидрометслужбы в получении экономического эффекта; N – общее число прогнозов; $\bar{R}_{ин}$, $\bar{R}_м$ – средние потери соответственно при использовании инерционных и методических прогнозов; $\mathcal{Z}_{ин}$ – предпроизводственные затраты – стоимость единицы прогностической информации.

Экономический эффект, как абсолютная величина полезности прогнозов, зависит от масштаба производственной единицы – мощности ТЭЦ (Q_p^T , Гкал/ч). Наряду с величиной \mathcal{E} целесообразно установить экономическую эффективность использования этого вида ресурсов в виде:

$$P = \frac{\mathcal{E}}{N\mathcal{Z}_{ин}} \quad (14)$$

как отношение экономического эффекта к затратам на его получение.

Экономическая эффективность отражает, таким образом, удельный экономический эффект, позволяющий установить величину сэкономленных материальных ценностей (средств, ресурсов и т.п.) на 1 рубль затрат на прогнозы, разрабатываемые в иной отрасли – в гидрометслужбе.

Величина $Z_{\text{ин}}$ принимается равной 1 тыс. рублей.

Разработанные в данной экономико-метеорологической модели матрицы сопряженности прогнозов, матрицы потерь, матрицы систематических потерь и выполненные оценки средних потерь позволяют представить ее заключительную часть – метод расчета энерго- и ресурсосбережения.

Метод оценки энерго- и ресурсосбережения

Ресурсосбережение в данной системе энергетики рассматривается как снижение расхода топлива на ТЭЦ. Это достигается в ситуациях избыточного теплоснабжения. Ошибки-страховки, содержащиеся в метеорологических прогнозах, значительно меньше подобных ошибок при использовании текущей погоды.

Оптимальное использование прогнозов позволяет установить следующее.

1. Снижение потерь при избыточном теплоснабжении $\Delta L_n(Q_n)$ и штрафных расходах при недодаче тепла $\Delta L_n(Q_n)$ рассчитываются по формулам:

$$\Delta L_n(Q_n) = k_1 \Delta \bar{R}_{\text{ин}}^{\text{онм}} n_n + k_3 \Delta \bar{R}_{\text{ин}}^{\text{онм}} n_n^* \quad (15)$$

и

$$\Delta L_n(Q_n) = k_2 \Delta \bar{R}_{\text{ин}}^{\text{онм}} n_n, \quad (16)$$

где k_i – коэффициенты пропорциональности, равные $k_1 = \frac{n_n}{n_n + n_n}$, $k_2 = \frac{n_n}{n_n + n_n}$,

$k_3 = \frac{n_n^*}{n_{i=j}} = 1$, полученные по данным матрицы сопряженности за отопительный

сезон или m лет; n_n^* – число удачных прогнозов (по главной диагонали матрицы).

2. Сбереженная тепловая энергия при известной стоимости выработки 1 Гкал есть величина:

$$\Delta E_n = \frac{\Delta L_n}{c_n}. \quad (17)$$

3. Сбереженное количество топлива определяется с учетом удельного расхода γ на выработку единицы тепловой энергии. Согласно [11, 18] принимается $\gamma = 140$ кг у.т./Гкал. Отсюда:

$$\Delta M_n = \Delta E_n \gamma. \quad (18)$$

В качестве единицы условного топлива принимается 1 кг топлива с теплотворной способностью 7000 ккал/кг (29,3 МДж/кг).

Результаты: оценки, выводы

Расчеты экономической полезности использования прогнозов температуры воздуха для ТЭЦ выполнялись по 25 пунктам России и некоторых смежных стран. Для этого использовались материалы, полученные из оперативных прогностических подразделений Росгидромета. Оценки показателей экономической полезности охватывали период с 1972 по 2006 гг. различной продолжительности для отдельных ТЭЦ.

В табл. 3 приведены результаты расчета экономической эффективности (P_m , P_{mo}) прогнозов температуры воздуха для ТЭЦ преимущественно Европейской территории России (ЕТР).

Таблица 3

Города теплоэлектростанций, по которым рассчитывались показатели экономической эффективности прогнозов

№ п/п	Город	Годы	Q_p^T , Гкал/ч	Число суточных прогнозов	P_m	P_{mo}
1	2	3	4	5	6	7
1	Архангельск	1986–1988	750	272	2,6	25,6
2	Астана	1999–2002	70	215	30,3	140,1
3	Владивосток	1989–1990	1023	227	48,7	61,7
4	Душанбе	1980–1981	170	168	6,7	12,7
5	Екатеринбург*	1998–2001	258	214	110,1	260,1
6	Иркутск	1989–1990	235	226	45,7	86,7
7	Калининград	1982–1987	160	195	10,0	16,1
8	Киев	1985–1987	879	213	2,4	4,7
9	Киров	1981–1986	275	249	18,9	22,6
10	Красноярск	1972–1976	100	234	2,7	3,7
11	Мончегорск*	1995–1998	860	282	81,8	308,0
12	Мурманск	1986–1988	260	304	12,2	24,5
13	Омск	1981–1985	59	216	0,7	1,7
14	Оренбург	1982–1988	56	206	2,7	10,7
15	Пенза	2003–2006	1148	190	45,4	47,9
16	Пермь*	1999–2002	330	218	117,8	181,0
17	Печора	1982–1984	46	211	2,7	5,7
18	Рига	1985–1987	600	233	5,4	8,6
19	Ростов-на-Дону	1998–2001	180	214	5,2	19,1
20	Самара	1981–1987	185	200	2,0	7,1

1	2	3	4	5	6	7
21	Санкт-Петербург (Северо-Западная ТЭЦ)	1980–2004	1460	210	19,7	23,7
22	Уфа*	2002–2003	1561	212	92,3	116,7
23	Харьков	1985–1987	650	242	1,4	5,5
24	Чебоксары	1982–1991	387	207	5,3	8,12

сумма			672,7	1402,3
среднее			28,0	58,4
предельные значения			0,7–117,8	1,7–308,0

Средние значения экономической эффективности использования прогнозов составляют соответственно 28,0 и 58,4 (при оптимальном использовании методических прогнозов). Если исключить крайне высокие их значения в четырех пунктах (Екатеринбург, Мончегорск, Пермь, Уфа), то средние значения величин P_m и P_{mo} соответственно равны 13,5 и 26,8.

По отдельным регионам и городам России заметно различаются мощности ТЭЦ (Q_p^t), успешность прогнозов, стоимость выработки тепловой энергии (c_n) и разработки прогнозов ($Z_{пп}$), что сказывается на конечном результате оценок показателей экономической полезности (Δ , P). Особое значение при этом имеет изменение коэффициента β от 0,1–0,3 (80-е годы) до 0,7 (2000-е годы). Считаем, что $\beta = 0,7–0,9$ наиболее реально при условии высокого на сегодня уровня научной и экономической автономности Росгидромета.

Заметим, что стоимость разработки прогностической информации ($Z_{пп}$ – затраты на наблюдения, передачу, преобразование, научное и техническое обеспечение) в настоящее время должно быть больше чем 1 тыс. руб. [13], что принималось в наших расчетах с 2000 г. Полагаем, что эта величина находится в пределах 5–10 тыс. руб. Пропорционально снизиться и величина показателей экономической полезности, но не эффективность фактической реализации прогнозов в теплоэнергетике.

Как видим, экономическая эффективность для некоторых ТЭЦ составляет более 100 рублей сэкономленных средств на 1 рубль затрат, приходящихся на единичный прогноз. Однако по большей части городов ЕТР за весь период исследования показатели экономической эффективности (P_m , P_{mo}) на порядок меньше.

Иллюстрацией высокой эффективности прогнозов температуры воздуха для супер-ТЭЦ ($Q_p^t \geq 1000$ Гкал/ч) является их реализация для Северо-Западной ТЭЦ в Санкт-Петербурге (табл. 4) за период с 2000 по 2006 г.

Оценка экономической полезности прогнозов температуры воздуха
для Северо-Западной ТЭЦ в Санкт-Петербурге, 2000 – 2006 гг.

Отопительный сезон, годы	Средние потери (\bar{R}), снижение потерь ($\Delta\bar{R}$)				
	\bar{R}_m , тыс. руб. прогноз	$\bar{R}_{ин}$, тыс. руб. прогноз	$\bar{R}_{мо}$, тыс. руб. прогноз	$\Delta\bar{R}_m^{ин}$, тыс. руб. прогноз	$\Delta\bar{R}_{мо}^{ин}$, тыс. руб. прогноз
2000–2001	374,6	551,9	350,1	177,3	201,8
2001–2002	373,7	613,4	358,2	239,7	255,2
2002–2003	397,3	593,8	367,0	196,5	226,8
2003–2004	354,4	500,8	305,0	146,4	195,8
2004–2005	344,3	531,3	325,9	187,0	205,4
2005–2006	335,9	432,0	314,0	96,1	118,0
Сумма	2180,2	3223,2	2020,2	1043,0	1203,0
Среднее	363,4	537,2	336,7	173,8	200,5
Отопительный сезон, годы	Показатели экономической полезности				
	\mathcal{E}_m , тыс. руб.	$\mathcal{E}_{мо}$, тыс. руб.	P_m	$P_{мо}$	
2000–2001	26409,7	30079,8	123,4	140,6	
2001–2002	35590,2	37901,2	167,1	177,9	
2002–2003	29012,2	33508,7	136,9	158,1	
2003–2004	23307,6	31226,4	101,8	136,4	
2004–2005	30727,2	33766,9	130,2	143,1	
2005–2006	15710,5	19328,4	66,6	81,9	
Сумма	160757,4	185811,4	726,0	838,0	
Среднее	26792,9	30968,6	121,0	139,7	

Суммарный за шестилетний период экономический эффект при стратегии доверия прогнозам только для данной ТЭЦ Санкт-Петербурга достигает около 161 млн руб., а при оптимальной стратегии примерно 186 млн руб. Соответственно экономическая эффективность в отдельные годы периода исследования колеблется в пределах 67–167 и 82–178. Если допустить, что стоимость единицы прогностической информации составляет не 1 тыс. руб., а 5 тыс. руб., то показатели эффективности P_m и $P_{мо}$ уменьшаются примерно в пять раз.

Расчет энерго- и ресурсосбережения выполнялся на основе снижения потерь $\Delta\bar{R}_{мо}^{ин}$ при оптимальном использовании прогнозов и характеристик ошибочности прогнозов (n_n и n_n) (табл. 5). Результаты расчетов приведены по Северо-Западной ТЭЦ Санкт-Петербурга (табл. 6).

Как видно по приведенным оценкам (табл. 6) *сбереженные тепловые ресурсы* (ΔE_n) по ситуациям возможного перерасхода топлива за шесть лет составили около 1,35 млн. Гкал, а за сезон около 225 тыс. Гкал. Топливные ресурсы, при этом, сберегаются на 189 тыс. тонн у.т. за весь период исследования.

ния и около 31 тыс. тонн у.т. за сезон. Особую характеристику представляют эти показатели, приведенные на 1 час работы ТЭЦ. Так, средняя величина ΔE_n ($\frac{\Gamma_{\text{кал}}}{\text{ч}}$), равная $42 \frac{\Gamma_{\text{кал}}}{\text{ч}}$, составляет около 3,0 % от тепловой мощности Северо-западной ТЭЦ ($1460 \frac{\Gamma_{\text{кал}}}{\text{ч}}$), что несомненно отражает эффективность учета метеорологического фактора.

Таблица 5

Исходная характеристика ошибок перерасхода (n_n) и недодачи (n_n) тепла в матрицах сопряженности прогнозов

Показатели	Годы (отопительные периоды)						Сумма	Среднее
	2000–2001	2001–2002	2002–2003	2003–2004	2004–2005	2005–2006		
N	214	213	212	229	236	236	1340	223
n_n	101	82	102	88	94	49	516	86
n_n	22	22	26	20	20	21	131	22
$n_{i=j}$	91	109	84	121	122	166	693	116
k_1	0,82	0,79	0,80	0,81	0,82	0,70	4,74	0,79
k_2	0,18	0,21	0,20	0,19	0,18	0,30	1,26	0,21
k_3	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	1,0

Таблица 6

Показатели энерго- и ресурсосбережения по Северо-Западной ТЭЦ Санкт-Петербурга, 2000 – 2006 гг.

Годы, отопительные сезоны	ΔL_n , тыс. руб. сезон	ΔE_n , $\frac{\Gamma_{\text{кал}}}{\text{сезон}}$	$\Delta E_n^* = \frac{\Delta E_n}{T}$, $\frac{\Gamma_{\text{кал}}}{\text{ч}}$	ΔM_n , $\frac{т \text{ у.т.}}{\text{сезон}}$	$\Delta M_n^* = \frac{\Delta M_n}{T}$, $\frac{т \text{ у.т.}}{\text{ч}}$	ΔL_n , тыс. руб. сезон
2000 – 2001	20463	171964	33,5	24075	4,7	466
2001 – 2002	30621	257325	50,3	36026	7,0	697
2002 – 2003	27496	231059	45,4	32348	6,4	787
2003 – 2004	24186	203251	37,0	28455	5,2	478
2004 – 2005	34152	286991	50,7	40179	7,1	618
2005 – 2006	23629	198566	35,1	27799	4,9	743
Сумма (2000 – 2006)	160547	1349156	252,0	188882	35,3	3789
Среднее	26758	224859	42,0	31480	5,9	632

Примечания: здесь $T = N\tau_{\text{сут}}$; $т \text{ у.т.}$ – тонны условного топлива; условное топливо есть количество данного топлива умноженное на коэффициент равный отношению теплосодержания 1 кг топлива данного вида к теплосодержанию 1 кг условного топлива (29,3076 МДж/кг).

Расчеты показателей экономической полезности прогнозов, выполненные по ряду пунктов России, приведены в табл. 7. За различные периоды лет отмечаются заметные колебания показателей экономической полезности прогнозов (ΔR , Р). Так, сбереженные материальные средства ($\Delta \bar{R}_m^{un}$) изменяются примерно от 4 до $380 \frac{\text{тыс. руб.}}{\text{прогноз}}$.

Экономический эффект при оптимальном использовании прогнозов отмечается в пределах от 87 тыс. руб. до 12,3 млн руб. Экономическая эффективность прогнозов в среднем составляет $R_m = 7,4$ и $R_{mo} = 15,0$. По ряду других городов России (Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург, Пермь, Уфа и другие) эффективность прогнозов на порядок больше.

Только в рассматриваемых городах России за счет прогнозов теплоэнергетика сберегает (ΔM_n) около 75 тыс. тонн топлива в условных единицах за сезон.

Как отмечалось в работе [16] среднее значение экономического эффекта по данным 12 ТЭЦ в период 1981–1987 гг. составило $50 \frac{\text{тыс. руб.}}{\text{сезон}}$. За последние 20 лет эта величина (Δ) возросла на 2–3 порядка (табл. 4, табл. 7), что отражает как период галопирующих цен, так и период последующего инфляционного роста. Конечно, в последнее десятилетие реальная эффективность прогнозов для теплоэнергетики, безусловно, заметно возросла.

Обращаясь к ТЭЦ с большой тепловой мощностью (табл. 8), видно, что величина экономического эффекта (Δ) и сбереженных топливных ресурсов (ΔM_n) существенно больше тех, которые получены для «средних» ТЭЦ. Характерно, что при условии $Q_p^T \geq 1000$ Гкал/ч сбереженные топливные ресурсы (ΔM_n) имеют почти четырехкратное превышение относительно ресурсосбережения на «средних» ТЭЦ.

Согласно оценкам, приведенным в табл. 7, средняя величина сбереженного топлива (снижение перерасхода) ΔM_n по данным восьми городов России составляет 9 416 900 кг у.т. или (с учетом $\gamma = 140$ кг у.т./Гкал) сбереженной тепловой энергии $\Delta E_n = 67263,6$ Гкал.

В России в 2000 г. производилось тепловой энергии Q^* около 2,64 млрд Гкал [7]. В качестве теплоисточников к настоящему времени выступают около 500 ТЭЦ в системе ТГК (более 240 ТЭЦ общего пользования и около 250 ТЭЦ промышленных предприятий), около 6,5 тысяч котельных большой и средней мощности, около 180 тысяч котельных малой мощности и около 600 тысяч автономных теплогенераторов и других незначительных по мощности теплоисточников. В производимой энергии на долю ТЭЦ приходится примерно $Q^*(\text{ТЭЦ}) = 950$ млн Гкал (36 % от Q^*).

Таблица 7

Показатели экономической полезности прогнозов температуры воздуха для ТЭЦ

Города	Годы	$Q_p^T, \frac{\text{Гкал}}{\text{ч}}$	$c_{п}, \frac{\text{руб.}}{\text{Гкал}}$	$c_{п} = 3c_{п}$	$\frac{\Delta \bar{R}_{м}, \text{ тыс. руб.}}{\text{прогноз}}$	$\frac{\Delta \bar{R}_{м}, \text{ тыс. руб.}}{\text{прогноз}}$	$\frac{\Delta \bar{R}_{м}, \text{ тыс. руб.}}{\text{прогноз}}$	$\frac{\Delta M_n, \text{ т у.т.}}{\text{сезон}}$	Экономический эффект за отопительный сезон, тыс.руб.		P_m	$P_{мо}$
									\bar{E}_m	$\bar{E}_{мо}$		
Архангельск	1986–1988	750	5,8	17,4	8,0	151,7	76,9	21732,4	212,2	2089,0	2,6	25,6
Калининград	1982–1987	170	6,0	18,0	15,1	30,7	32,3	9200,0	1211,0	1673,1	6,2	8,6
Киров, ТЭЦ-4	1981–1986	275	5,9	17,7	37,8	44,0	45,1	10400,0	938,7	1120,5	18,9	22,6
Мурманск	1986–1988	300	6,2	18,6	36,8	99,8	73,6	138,4	1112,6	2231,4	12,2	24,5
Ростов-на-Дону, ТЭЦ-2	1998–2001	180	100,0	300,0	53,0	242,0	194,0	4064,1	3338,0	12262,0	5,2	19,1
Самара	1981–1986	185	4,3	12,9	4,2	16,2	4,8	5675,8	75,9	87,0	2,1	2,4
Санкт-Петербург, ТЭЦ-7	1981–1986	344	4,2	12,6	380,0	730,0	700,0	14624,6	274,7	355,5	6,8	8,8
Чебоксары, ТЭЦ-3	1982–1991	387	4,0–11,4	12,0–34,2	16,1	82,2	24,3	9500,0	1041,3	1584,8	5,3	8,1
Сумма					551,0	1396,6	1151,0	75335,3	8204,4	21403,3	59,3	119,7
Среднее					68,9	174,6	143,9	9416,9	1025,6	2675,4	7,4	15,0

Таблица 8

Экономическая полезность прогнозов температуры воздуха для некоторых ТЭЦ крупных городов России

Города	Годы	$Q_p^T, \frac{Гкал}{ч}$	$\overline{\Delta R_m}^{ин},$ тыс. руб. прогноз	$\overline{\Delta R_{mo}}^{ин},$ тыс. руб. прогноз	$\Delta M_n^T,$ т. у.т. сезон	Экономический эффект за отопительный сезон, тыс.руб.		P_m	P_{mo}
						Θ_m	Θ_m		
Москва, ТЭЦ-21	2004–2006	4603	277,7	482,1	106633,8	41057,7	71381,9	193,5	336,5
Пенза, ТЭЦ-1	2003–2006	1148	152,4	160,7	28268,7	8327,0	8783,5	45,4	47,9
Пермь, ТЭЦ-9	1999–2002	1683	207,6	278,0	39231,4	15272,0	20453,3	70,0	93,8
Санкт-Петербург (Северо-Западная ТЭЦ)	2000–2006	1460	173,8	200,5	31480,4	26792,9	30968,6	121,0	139,7
Уфа, ТЭЦ-4	1998–2003	1561	75,9	113,1	35306,4	16120,8	25833,4	78,6	125,6
Сумма			887,4	1234,4	240920,7	107570,4	157420,7	508,5	743,5
Среднее			177,5	246,9	48184,1	21514,1	31484,1	101,7	148,7

За счет оптимального использования прогнозов только на 500 ТЭЦ, в принятом допущении, сберегается тепловой энергии $67263,6 \times 500 = 33,6$ млн Гкал, что составляет 3,5 % от $Q^*(ТЭЦ)$. Примерно такая же величина сбереженной тепловой энергии потенциально содержится в теплоэнергетике ГУП «ТЭК России». Можно утверждать, что около 10% вырабатываемой тепловой энергии и топливных ресурсов в России можно сберечь за счет оптимального использования прогнозов на основе рассмотренного экономико-метеорологического метода. Приведенная оценка еще в большей мере подтверждается данными, приведенными по крупным городам (табл. 8).

В заключение приведем следующие положения ретроспективного и перспективного характера.

1. Метеорологический фактор постоянно выполняет роль *природного регулятора*, обеспечивающего *оптимальный расход топливных ресурсов*, а значит и оптимальное потребление тепловой энергии.

2. Обобщение результатов за предшествующие 20 лет по ряду ТЭЦ России показывает, что оптимальная оперативная адаптация теплоэнергетики к температурным условиям позволяет сберегать углеводородное топливо – природный газ *на миллионы тонн* (в условных единицах) за отопительный сезон.

3. Сохраняется необходимость дальнейшего совершенствования методов *регионального прогноза* среднесуточной температуры воздуха, особенно в регионах Заполярья и Дальнего Востока.

4. В мегаполисах и крупных городах России прогнозы температуры воздуха должны быть *районированы* и передаваться потребителям (ТЭЦ ТГК и ГУП «ТЭК») в *картированной форме*.

5. Необходимо узаконить *режим оперативного накопления данных «прогноз-факт»* по среднесуточной температуре воздуха, формирование соответствующей базы данных и программного обеспечения разработки матриц сопряженности прогнозов, оценки их успешности и экономической полезности.

6. Матрица потерь, полученная на основе функции потерь $s(\Delta t_{np})$, является *относительно стабильной характеристикой* теплоисточника и может использоваться в течение, по меньшей мере, *пяти лет*.

7. Для каждой ТЭЦ (в ТГК и ТЭК) необходима разработка индивидуального *регламента оптимального задания режима работы теплоисточника* на основе матрицы систематических потерь.

8. Результаты оценки экономической полезности прогнозов (Э, Р) должны находить *отражение в договорных соглашениях* с потребителями – организациями ТГК и ТЭК в рамках специализированного гидрометеорологического обеспечения.

9. Необходимо провести исследование энерго- и ресурсосбережения на крупнейших ТЭЦ на базе совместного Соглашения Росгидромета и ТГК России.

Литература

1. *Багров. Н.А.* О хозяйственной полезности гидрометеорологических прогнозов // Труды Гидрометцентра СССР. Вып. 159. 1975, с. 101–114.
2. *Бедрицкий А.И., Хандошко Л.А.* Экономическая полезность гидрометеорологического обеспечения // Бюлл. ВМО. 2001. Т. 50, № 3, с. 266–271.
3. *Бедрицкий А.И., Кориунов А.А., Хандошко Л.А., Шаймарданов М.З.* Климатическая система и обеспечение гидрометеорологической безопасности жизнедеятельности России. // Всемирн. конф. по изменен. климата. Москва, 29 сентября – 3 октября 2003.
4. *Бедрицкий А.И.* Международные соглашения по проблеме глобального изменения климата и участия в них России. // Бизнес. Междунар. журн. Спецвып. Киотский протокол: политика и практика. 2003, с. 4–6.
5. *Воробьев В.Н., Хандошко Л.А.* Метеорологический фактор ресурсосбережения в теплоэнергетике Санкт-Петербурга. // Ученые записки. Вып.1. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2005, с. 163–175.
6. *Ефимов В.* Перспективы конкуренции на рынке теплоснабжения // Коммунальный комплекс России, 2004, № 4, с. 38–40.
7. *Зингер Н.М., Белевич А.И.* Отечественная теплофикация, 75 лет развития // Теплоэнергоэффективные технологии, № 2, 1999, с. 6–11.
8. *Карпеев Г.А.* О математической модели оценки эффективности краткосрочных прогнозов температуры воздуха. / В кн.: Эффективность гидрометеорологического обслуживания народного хозяйства.– Л.: Гидрометеиздат, 1973, с. 45–52.
9. *Каганович Б.М.* Дискретная оптимизация тепловых сетей. – Новосибирск: Наука, 1978. – 88 с.
10. *Кузнецова Н.Н.* Результаты оценки эффективности обслуживания ТЭЦ Мосэнерго ежедневными прогнозами температуры воздуха. / В кн.: Эффективность гидрометеорологического обслуживания народного хозяйства.– Л.: Гидрометеиздат, 1973, с. 56–62.
11. *Некрасов А.С.* Теплоснабжение России: необходима новая стратегия. // Теплоэнергоэффективные технологии, № 2, 1999, с. 20–23.
12. *Сеннова Е.В., Сидлер В.Г.* Математическое моделирование и оптимизация развивающихся теплоснабжающих систем. – Новосибирск, 1985. – 222 с.
13. *Соснова С.А.* Энергосбережение как мотивация преобразований // Энергосбережение, вып. 7, 2007, с. 19 – 20.
14. *Хандошко Л.А., Вдовин В.Б.* Функции метеорологических потерь теплоэлектростанций. // Труды ГГО, вып. 528, 1989, с. 49–57.
15. *Хандошко Л.А., Вдовин В.Б.* Методика оценки экономического эффекта прогноза температуры воздуха для теплоцентралей // Труды ГГО, 1989, Вып. 528, с. 58–74.
16. *Хандошко Л.А.* Метеорологические факторы экономии топливных ресурсов в теплоэнергетике. Гидрометеорология – научно-техническому прогрессу // Сб. научн. трудов. – Л.: Изд. ЛГМИ, 1990, вып. 106, с. 75–82.
17. *Хандошко Л.А.* Экономическая метеорология. – СПб.: Гидрометеиздат, 2005. – 490 с.
18. *Хандошко Л.А.* Методические основы энерго- и ресурсосбережения в теплоэнергетике России // Метеоспектр, 2006, № 2, с. 93–103.
19. *Хандошко Л.А.* Метод оценки экономического эффекта и экономической эффективности метеорологических прогнозов // Метеоспектр. 2006, № 2, с. 27–40.
20. *Хандошко Л.А., Фокичева А.А.* Оптимальное природопользование – механизм эффективной экономики предприятия. // Сб. научн. трудов кафедры экономики предприятия и учетных систем и кафедры экономики и менеджмента. – СПб.: изд. РГГМУ, 2007, с. 46–63.
21. *Хей Дж.* Введение в методы байесовского статистического вывода. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 336 с.

Ключевые слова: теплоэнергетика, функция потерь, экономический эффект, экономическая эффективность, ресурсосбережение.