

Л.А. Хандоужко, А.Г. Тимофеева

**ОЦЕНКА УСПЕШНОСТИ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ
ПОЛЕЗНОСТИ ПРОГНОЗОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА
ДЛЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ МОСКВЫ**

L.A. Handozhko, A.G. Timofeyeva

**THE SCORE OF SUCCESS AND ECONOMIC VALUE
OF AIR TEMPERATURE FORECASTS
FOR MOSCOW THERMAL PRODUCTION**

Исследована успешность многофазовых прогнозов температуры воздуха для теплоэнергетики Москвы на основе современных критериев адекватности. Рассмотрены основные аспекты погодозависимости теплоэнергетики, выделены условия оптимизации, дана численная оценка экономической полезности прогнозов температуры воздуха для теплоэнергетики Москвы.

Ключевые слова: успешность прогнозов, метеорологические потери, теплоэнергетика Москвы.

The success score of multiphase air temperature forecasts for Moscow thermal production is studied based on the modern criteria of adequacy. Principal aspects of weather dependence for the thermal production industry are considered, the optimization conditions are identified, a numeric estimate for economic value of air temperature forecasts for Moscow thermal production is presented.

Key words: success score, meteorological losses, Moscow thermal production.

Введение

Одной из основных проблем современной экономики выступают проблемы энергосбережения и повышения энергоэффективности, которые носят международный характер. Главным мотивом энергосбережения должно быть сохранение окружающей естественной среды и даже ее улучшение, а также защита интересов будущих поколений в сохранении традиционных природных источников энергии, но уже как сырья для химической и медицинской промышленности. Возможности энергосбережения в перспективе представляются неисчерпаемыми, поскольку оно охватывает новые страны и сферы деятельности и одновременно подпитывается новыми научно-техническими достижениями и инструментами воздействия на поведение потребителей.

Так, принятая в 2003 г. энергетическая стратегия России [Распоряжение Правительства РФ, 2003] предусматривает получить к 2020 г. 2/3 прироста про-

дукции за счет энергосбережения, при этом наиболее весомыми выступают структурные изменения. Теплоэнергетика как специфическая отрасль экономики и особая инфраструктура хозяйственной деятельности полностью зависит от погодо-климатического фактора. Климат в целом и его реализация в погодных условиях существенно определяют различия погодозависимости теплоэнергетики. Учет таких информационных природных ресурсов, как прогноз температуры воздуха и скорости ветра занимает в теплоэнергетике ведущую роль. Адаптация под ожидаемую погоду, в сущности, и определяет эффективность теплоисточника с точки зрения ресурсопотребления, а значит, и ресурсосбережения. Внедрение научных методов использования метеорологической информации, прежде всего прогнозов погоды, позволяет значительно снизить издержки в экономике страны за счет влияния погодных условий. Наряду с климатической информацией метеорологические прогнозы находят все более широкий спектр потребителей. Влияние метеорологических факторов на производство тепловой энергии прослеживается на всех этапах функционирования ТЭЦ и сказывается непосредственно на задании режима работы теплоисточника, на колебаниях спроса на тепловую энергию, а также на условиях эксплуатации и содержания тепловых сетей. Для оценки успешности прогнозов было выполнено соответствующее исследование за период с 2003 по 2008 г., т.е. за пять отопительных периодов.

Оценка успешности прогнозов температуры воздуха

Прогнозы температуры воздуха являются многофазовыми. Как особое состояние среды температура воздуха классифицируется, т.е. выделяются определенные фазы – уровни дискретности.

Фазовое представление прогнозов температуры воздуха отвечает требованиям практики, а сама область изменения может содержать различное число градаций в зависимости от требований потребителя, от его производственной специфики.

Одним из основных требований, предъявляемых к прогнозам, является их высокая успешность, что отвечает возможности, допустимости их хозяйственной реализации.

Заметим, что до настоящего времени проблема оценки успешности метеорологических прогнозов еще не получила полного решения. Существующая административная система оценки не полностью отвечает условиям объективности и возможности адекватного отображения прогнозируемых и фактических значений данной метеорологической величины [Хандожко, 2005].

Матричная система оценки успешности прогнозов, как это следует из многочисленных публикаций [Хандожко, 2005, 2006; Хандожко, Вдовин, 1989] является более предпочтительной, имеющей ряд преимуществ. Она объективна, т.е. исключает возможности адаптации текста прогноза к условиям благоприятной оценки. Число градаций во всем диапазоне изменений температуры воздуха может быть задано потребителем, что отвечает более эффективной ее реализа-

ции. Матричная система позволяет использовать ряд известных критериев оценки успешности, а также перевести дискретную форму представления прогнозов в вероятностную, что необходимо не только в прогностической практике, но и при оценке экономической полезности прогнозов. Выбор системы оценки позволяет дать более объективные предпосылки совершенствования прогнозов. Как отмечал М.И. Юдин [Юдин, 1963], это может ускорять или тормозить развитие методов прогноза.

Разработка матриц сопряженности прогнозов температуры воздуха

Многофазовая матрица сопряженности содержит N прогнозов в принятых градациях, которые получают отображение в виде чисел сопряженности n_{ij} – прогноз (Π_j) – факт (Φ_i). Множество значений среднесуточной температуры воздуха (\bar{t}), сгруппированные в градации, отвечает требованиям, предъявляемым к многофазовым матрицам-таблицам $n \times m$ порядка. Частоты n_{ij} есть группы значений \bar{t} , попавших в последовательно расположенные интервалы. Порядок матрицы $n \times m$ устанавливаем на основании статистической оценки возможного числа интервалов, градаций.

Все исходные данные получены по Москве за отопительные периоды 2003–2008 гг. Фактические наблюдения (Φ_i) – данные метеостанции ВДНХ, прогностические данные (Π_j) – результаты прогнозирования Гидрометцентра по территории Москвы. Продолжительность отопительного периода для Москвы устанавливалась с октября по апрель включительно, что определяет объем выборки, и меняется около значения $N = 212$. При разработке матрицы сопряженности необходимо было прежде всего решить задачу определения числа градаций, содержащихся в матрице сопряженности. Для этого используются известные соотношения. Согласно рекомендациям К. Брукса и Н. Карузерса [Кендалл, 1973], число градаций k есть величина

$$k = 5 \lg N, \quad (1)$$

где N – число суток, т.е. общее число случаев в статистической выборке. Е. Тонеева [Таушанова, 1973] предложила следующую формулу:

$$k = 5 \lg N - 5. \quad (2)$$

Согласно методу З. Таушановой, возможно использование формулы вида

$$k = 4 \lg N. \quad (3)$$

В книге И. Хайнхольда и К. Гайдеке [Heinhold, 1964] приводится формула вида

$$k = \sqrt{N}. \quad (4)$$

Наряду с этим допускается условие выбора k [Heinhold, 1964]:

$$\left. \begin{array}{l} N \dots 50 \quad 100 \quad 500 \\ k \dots 8 \quad 10 \quad 13 \end{array} \right\} \quad (5)$$

Исследовав особенности кривых распределения, И.У. Алексеева [Новицкий, 1991] установила, что для расчета оптимального значения k необходимо знать величину эксцесса ε (крутости кривой распределения):

$$k = \frac{\varepsilon + 1,5}{6} N^{0,4}. \quad (6)$$

Таким образом, выбор числа градаций в матрице сопряженности должен учитывать не только объем выборки (N), но и форму распределения, выраженную эксцессом (ε).

Используя данные о продолжительности отопительного периода по Москве за 2003–2008 гг., находим, что число градаций k в многофазовой матрице сопряженности прогнозов среднесуточной температуры воздуха колеблется в пределах 11–15.

С учетом $N = 212$ среднее значение числа градаций составляет $\bar{k} = 13$. Заметим, что число градаций и их ширина должны определяться с учетом специфики зависимости теплоэнергетики от метеорологических условий. В данном исследовании установлено, что число градаций в теплые зимы естественно уменьшается. Ширина градации может быть задана из условий прогностической градации или требований потребителя. Возможно использование следующей формулы:

$$l = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{k}, \quad (7)$$

где k – число градаций; A_{\max} , A_{\min} – экстремальные значения температуры воздуха.

Ширина градаций получена равной $l = 3$ °С. В данном исследовании для более полного анализа использовалась матрица сопряженности с шириной градации 2 °С.

Дискретность матриц сопряженности прогнозов зависит от специфики работы теплоисточника (мощности ТЭЦ, режима метеоусловий, охвата территорий). Матричное обобщение метеорологических прогнозов позволяет более достоверно установить не только успешность прогнозов, но также тепловые и стоимостные потери при избыточном и недостаточном теплоснабжении.

Выбор критериев оценки успешности прогнозов

При оценке качества многофазовых прогнозов используемый статистический материал, содержащийся в матрицах сопряженности, который должен отвечать известным принципам Фишера, а также известным требованиям критериев оценки, представлен в работе [Хандожко, 2005].

Наряду с разработкой матриц сопряженности методических прогнозов $\|n_{ij}\|$ получены соответствующие матрицы сопряженности инерционных прогнозов $\|n_{ij}\|$. Случайное прогнозирование идентифицируется оценкой критерия Пирсона. В дальнейшем рассматривается ряд критериев (показателей) оценки успешности, получивших широкое признание и практическое применение в отечественных и зарубежных исследованиях и в оперативной практике Национальных метеорологических служб.

1. Информационное соотношение, которое показывает, какая часть неопределенности климатологических прогнозов устраняется с помощью методических прогнозов:

$$v = \frac{H(\Phi) - H(\Pi)}{H(\Phi)} = 1 - \frac{H(\Pi)}{H(\Phi)}, \quad (8)$$

где $H(\Phi)$ – климатическая, или безусловная, энтропия явления; $H(\Pi)$ – условная энтропия; $I = H(\Phi) - H(\Pi)$ – количество прогностической информации.

2. Показатель сопряженности по А. Чупрову [Чупров, 1960]:

$$K = \sqrt{\frac{\chi^2}{N\sqrt{(k_1-1)(k_2-1)}}}, \quad (9)$$

где χ^2 – критерий независимости Пирсона, определяемый следующей формулой:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{(n_{ij} - n_{ij}^{сл})^2}{n_{ij}^{сл}}, \quad (10)$$

где k_1 и k_2 – соответственно число строк и столбцов; а $n_{ij}^{сл} = \frac{n_{i0} \times n_{0j}}{N}$.

3. Меры Гутмана.

Уменьшение относительной ошибки прогноза Π_j на основании признака Φ_i определяется по формуле:

$$\lambda(\Pi/\Phi) = \frac{\sum_j n_{j \max} - n_{i0 \max}}{N - n_{i0 \max}} = \frac{A}{N - n_{i0 \max}}. \quad (11)$$

Снижение относительной ошибки признака Φ на основании прогноза Π :

$$\lambda(\Phi/\Pi) = \frac{\sum_i n_{i \max} - n_{0j \max}}{N - n_{0j \max}} = \frac{B}{N - n_{0j \max}}. \quad (12)$$

Для оценки общей связности признаков Π и Φ используется обобщенная мера:

$$\lambda = \frac{A + B}{(N - n_{i0 \max}) + (N - n_{0j \max})}. \quad (13)$$

4. Меры Гудмена–Крускала.

Данная мера успешности позволяет установить взаимозависимость категорий (Π_j, Φ_i) , определяемую пропорционально наблюдаемым итогам в матрице сопряженности. Рассчитываются две частные меры и на их основе генеральная:

$$\tau(\Pi / \Phi) = \frac{\sum_i \sum_j \left[\frac{(Nn_{ij} - n_{i0}n_{0j})^2}{n_{0j}} \right]}{N \left(N^2 - \sum_i n_{i0}^2 \right)} \quad (14)$$

и

$$\tau(\Phi / \Pi) = \frac{\sum_i \sum_j \left[\frac{(Nn_{ij} - n_{i0}n_{0j})^2}{n_{i0}} \right]}{N \left(N^2 - \sum_j n_{0j}^2 \right)}. \quad (15)$$

Общая генеральная мера успешности

$$\tau = \frac{\sum_i \sum_j \left[\frac{(Nn_{ij} - n_{i0}n_{0j})^2}{n_{0j}} \right] + \sum_i \sum_j \left[\frac{(Nn_{ij} - n_{i0}n_{0j})^2}{n_{i0}} \right]}{2N^3 - N \left(\sum_i n_{i0}^2 + \sum_j n_{0j}^2 \right)}. \quad (16)$$

Генеральная мера τ равна относительному уменьшению вероятности неправильного предсказания одной переменной при известной другой. Она рассматривается как симметризованный коэффициент, отражающий предсказуемость в обе стороны – зависимость Π_j от Φ_i и Φ_i от Π_j .

Численная оценка успешности прогнозов температуры воздуха для ТЭЦ Москвы

В целях оптимизации выработки тепловой энергии и теплообеспечения используется прогноз среднесуточной температуры воздуха. По территории Москвы рассчитываются прогностические $[\overline{t_{\text{пр}}} = 0,5(\overline{t_{\text{пр}}} \text{ночь} + \overline{t_{\text{пр}}} \text{день})]$ и фактические $[\overline{t_{\text{ф}}} = 0,5(\overline{t_{\text{ф}}} \text{ночь} + \overline{t_{\text{ф}}} \text{день})]$ среднесуточные значения температуры воздуха.

На этом основании разрабатывались матрицы сопряженности методических и инерционных прогнозов. Прогностические и фактические значения для матрицы сопряженности инерционных прогнозов устанавливались только по фактическим материалам.

Приведенные критерии успешности (8)–(16) позволяют установить достаточно объективную оценку прогнозирования температуры воздуха для теплоэнергетики Москвы.

Каждый из приведенных критериев, как уже отмечалось, отражает ту или иную особенность результатов прогнозирования температуры, сведенных в матрицы сопряженности.

Приведенные критерии рассчитывались для каждого из пяти отопительных сезонов по Москве. Результаты расчетов приведены в таблицах 1–6.

Таблица 1

Оценка успешности прогнозов температуры воздуха для ТЭЦ г. Москвы за отопительный период 2003–2004 гг.

Показатель	Методические прогнозы	Инерционные прогнозы	$\Delta = \zeta_m - \zeta_n$
Информационное отношение	$H(\Pi)_m = 0,443$	$H(\Pi)_n = 0,504$	$\Delta H(\Pi) = -0,061$
	$v_m = 0,519$	$v_n = 0,452$	$\Delta v = 0,067$
Критерий Пирсона	$\chi_m^2 = 717,83$	$\chi_n^2 = 565,6$	$\Delta \chi^2 = 152,2$
Коэффициент сопряженности по Чупрову	$K_m = 0,509$	$K_n = 0,453$	$\Delta K = 0,056$
Меры Гутмана	$\lambda(\Pi/\Phi)_m = 0,434$	$\lambda(\Pi/\Phi)_n = 0,395$	$\Delta \lambda(\Pi/\Phi) = 0,039$
	$\lambda(\Phi/\Pi)_m = 0,449$	$\lambda(\Phi/\Pi)_n = 0,419$	$\Delta \lambda(\Phi/\Pi) = 0,030$
	$\lambda_m = 0,442$	$\lambda_n = 0,407$	$\Delta \lambda = 0,035$
Меры Гудмена–Крускала	$\tau(\Pi/\Phi)_m = 0,322$	$\tau(\Pi/\Phi)_n = 0,265$	$\Delta \tau(\Pi/\Phi) = 0,057$
	$\tau(\Phi/\Pi)_m = 0,331$	$\tau(\Phi/\Pi)_n = 0,285$	$\Delta \tau(\Phi/\Pi) = 0,046$
	$\tau_m = 0,326$	$\tau_n = 0,275$	$\Delta \tau = 0,051$

По всем приведенным критериям методические прогнозы имеют более высокий успех прогнозирования, чем инерционные. Заметим, что при оценке критерия v климатическая энтропия достигает 0,987, что подтверждает сложность достижения успеха прогнозирования.

Наибольшее расхождение методических и инерционных прогнозов наблюдается в сезон 2005–2006 гг. Минимальное различие отмечается в сезон 2003–2004 гг. Видно, что по этим годам все критерии успешности указывают на постоянное преимущество методических прогнозов для теплоэнергетики Москвы относительно инерционных. Это подтверждает, что использование в оперативной практике методов прогнозирования температуры воздуха отражает научную обоснованность учета физических процессов, формирующихся над Европейской территорией страны. Отсюда очевидна и необходимость учета оперативных прогнозов в целях задания оптимального режима работы теплоисточника.

Таблица 2

**Оценка успешности прогнозов температуры воздуха для ТЭЦ г. Москвы
за отопительный период 2004–2005 гг.**

Показатель	Методические прогнозы	Инерционные прогнозы	$\Delta = \zeta_m - \zeta_n$
Информационное отношение	$H(\Pi)_m = 0,443$	$H(\Pi)_n = 0,580$	$\Delta H(\Pi) = -0,137$
	$v_m = 0,541$	$v_n = 0,400$	$\Delta v = 0,141$
Критерий Пирсона	$\chi_m^2 = 713,1$	$\chi_n^2 = 441,3$	$\chi^2 = 271,8$
Коэффициент сопряженности по Чупрову	$K_m = 0,508$	$K_n = 0,401$	$\Delta K = 0,107$
Меры Гутмана	$\lambda(\Pi/\Phi)_m = 0,477$	$\lambda(\Pi/\Phi)_n = 0,285$	$\Delta\lambda(\Pi/\Phi) = 0,192$
	$\lambda(\Phi/\Pi)_m = 0,508$	$\lambda(\Phi/\Pi)_n = 0,297$	$\Delta\lambda(\Phi/\Pi) = 0,211$
	$\lambda_m = 0,492$	$\lambda_n = 0,291$	$\Delta\lambda = 0,201$
Меры Гудмена–Крускала	$\tau(\Pi/\Phi)_m = 0,335$	$\tau(\Pi/\Phi)_n = 0,210$	$\Delta\tau(\Pi/\Phi) = 0,125$
	$\tau(\Phi/\Pi)_m = 0,377$	$\tau(\Phi/\Pi)_n = 0,213$	$\Delta\tau(\Phi/\Pi) = 0,164$
	$\tau_m = 0,356$	$\tau_n = 0,212$	$\Delta\tau = 0,144$

Таблица 3

**Оценка успешности прогнозов температуры воздуха для ТЭЦ г. Москвы
за отопительный период 2005–2006 гг.**

Показатель	Методические прогнозы	Инерционные прогнозы	$\Delta = \zeta_m - \zeta_n$
Информационное отношение	$H(\Pi)_m = 0,315$	$H(\Pi)_n = 0,522$	$\Delta H(\Pi) = -0,207$
	$v_m = 0,675$	$v_n = 0,497$	$\Delta v = 0,178$
Критерий Пирсона	$\chi_m^2 = 1217,7$	$\chi_n^2 = 775,$	$\Delta\chi^2 = 442,8$
Коэффициент сопряженности по Чупрову	$K_m = 0,664$	$K_n = 0,531$	$\Delta K = 0,133$
Меры Гутмана	$\lambda(\Pi/\Phi)_m = 0,575$	$\lambda(\Pi/\Phi)_n = 0,357$	$\Delta\lambda(\Pi/\Phi) = 0,218$
	$\lambda(\Phi/\Pi)_m = 0,580$	$\lambda(\Phi/\Pi)_n = 0,357$	$\Delta\lambda(\Phi/\Pi) = 0,223$
	$\lambda_m = 0,577$	$\lambda_n = 0,357$	$\Delta\lambda = 0,220$
Меры Гудмена–Крускала	$\tau(\Pi/\Phi)_m = 0,428$	$\tau(\Pi/\Phi)_n = 0,248$	$\Delta\tau(\Pi/\Phi) = 0,180$
	$\tau(\Phi/\Pi)_m = 0,475$	$\tau(\Phi/\Pi)_n = 0,257$	$\Delta\tau(\Phi/\Pi) = 0,218$
	$\tau_m = 0,451$	$\tau_n = 0,253$	$\Delta\tau = 0,198$

Таблица 4

Оценка успешности прогнозов температуры воздуха для ТЭЦ г. Москвы за отопительный период 2006–2007 гг.

Показатель	Методические прогнозы	Инерционные прогнозы	$\Delta = \zeta_m - \zeta_n$
Информационное отношение	$H(\Pi)_m = 0,348$	$H(\Pi)_n = 0,523$	$\Delta H(\Pi) = -0,175$
	$v_m = 0,627$	$v_n = 0,437$	$\Delta v = 0,190$
Критерий Пирсона	$\chi_m^2 = 1041,9$	$\chi_n^2 = 536,1$	$\Delta \chi^2 = 511,8$
Коэффициент сопряженности по Чупрову	$K_m = 0,616$	$K_n = 0,442$	$\Delta K = 0,174$
Меры Гутмана	$\lambda(\Pi/\Phi)_m = 0,525$	$\lambda(\Pi/\Phi)_n = 0,268$	$\Delta \lambda(\Pi/\Phi) = 0,257$
	$\lambda(\Phi/\Pi)_m = 0,550$	$\lambda(\Phi/\Pi)_n = 0,372$	$\Delta \lambda(\Phi/\Pi) = 0,178$
	$\lambda_m = 0,537$	$\lambda_n = 0,370$	$\Delta \lambda = 0,167$
Меры Гудмена–Крускала	$\tau(\Pi/\Phi)_m = 0,433$	$\tau(\Pi/\Phi)_n = 0,271$	$\Delta \tau(\Pi/\Phi) = 0,163$
	$\tau(\Phi/\Pi)_m = 0,433$	$\tau(\Phi/\Pi)_n = 0,273$	$\Delta \tau(\Phi/\Pi) = 0,160$
	$\tau_m = 0,433$	$\tau_n = 0,272$	$\Delta \tau = 0,161$

Таблица 5

Оценка успешности прогнозов температуры воздуха для ТЭЦ г. Москвы за отопительный период 2007–2008 гг.

Показатель	Методические прогнозы	Инерционные прогнозы	$\Delta = \zeta_m - \zeta_n$
Информационное отношение	$H(\Pi)_m = 0,354$	$H(\Pi)_n = 0,494$	$\Delta H(\Pi) = -0,140$
	$v_m = 0,608$	$v_n = 0,432$	$\Delta v = 0,176$
Критерий Пирсона	$\chi_m^2 = 621,7$	$\chi_n^2 = 457,6$	$\Delta \chi^2 = 164,1$
Коэффициент сопряженности по Чупрову	$K_m = 0,474$	$K_n = 0,409$	$\Delta K = 0,065$
Меры Гутмана	$\lambda(\Pi/\Phi)_m = 0,524$	$\lambda(\Pi/\Phi)_n = 0,376$	$\Delta \lambda(\Pi/\Phi) = 0,148$
	$\lambda(\Phi/\Pi)_m = 0,540$	$\lambda(\Phi/\Pi)_n = 0,380$	$\Delta \lambda(\Phi/\Pi) = 0,160$
	$\lambda_m = 0,532$	$\lambda_n = 0,378$	$\Delta \lambda = 0,154$
Меры Гудмена–Крускала	$\tau(\Pi/\Phi)_m = 0,386$	$\tau(\Pi/\Phi)_n = 0,260$	$\Delta \tau(\Pi/\Phi) = 0,126$
	$\tau(\Phi/\Pi)_m = 0,429$	$\tau(\Phi/\Pi)_n = 0,277$	$\Delta \tau(\Phi/\Pi) = 0,152$
	$\tau_m = 0,408$	$\tau_n = 0,269$	$\Delta \tau = 0,139$

Таблица 6

Оценка успешности прогнозов температуры воздуха для ТЭЦ г. Москвы за отопительные периоды 2003–2008 гг.

Показатель	Методические прогнозы	Инерционные прогнозы	$\Delta = \zeta_m - \zeta_n$
Информационное отношение	$H(\Pi)_m = 0,428$	$H(\Pi)_n = 0,566$	$\Delta H(\Pi) = -0,138$
	$v_m = 0,565$	$v_n = 0,421$	$\Delta v = 0,144$
Критерий Пирсона	$\chi_m^2 = 5455,3$	$\chi_n^2 = 3614,9$	$\Delta \chi^2 = 1840,4$
Коэффициент сопряженности по Чупрову	$K_m = 0,628$	$K_n = 0,513$	$\Delta K = 0,115$
Меры Гутмана	$\lambda(\Pi/\Phi)_m = 0,506$	$\lambda(\Pi/\Phi)_n = 0,340$	$\Delta \tau(\Pi/\Phi) = 0,166$
	$\lambda(\Phi/\Pi)_m = 0,517$	$\lambda(\Phi/\Pi)_n = 0,374$	$\Delta \tau(\Phi/\Pi) = 0,143$
	$\lambda_m = 0,512$	$\lambda_n = 0,344$	$\Delta \lambda = 0,168$
Меры Гудмена–Крускала	$\tau(\Pi/\Phi)_m = 0,354$	$\lambda(\Pi/\Phi)_n = 0,228$	$\Delta \tau(\Pi/\Phi) = 0,126$
	$\tau(\Phi/\Pi)_m = 0,368$	$\lambda(\Phi/\Pi)_n = 0,241$	$\Delta \tau(\Phi/\Pi) = 0,127$
	$\tau_m = 0,361$	$\tau_n = 0,234$	$\Delta \tau = 0,127$

В отопительные периоды 2004–2005, 2005–2006, 2006–2007 гг. успешность прогнозов достаточно велика. Однако в эти же периоды отмечается рост успешности инерционных прогнозов, что связано с большой частотой антициклонных процессов.

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, так и недостаточного теплоснабжения со всеми вытекающими социальными и экономическими последствиями.

В целом за отопительные периоды 2003–2008 гг. (табл. 6) успешность прогнозов температуры воздуха отвечает требованиям теплоэнергетики Москвы.

Некоторые результаты оценки оптимального теплообеспечения Москвы

Используется байесовский подход минимизации потерь в теплоэнергетике. Задача любого потребителя постоянно находить такие оперативные решения и действия, которые на основе учета прогнозов могут обеспечить минимум экономических издержек в специфических условиях производства.

Выбор оптимальной стратегии решается при известном множестве состояний погоды $\Omega(\Phi)$, принимаемых решений и действий $\Omega(d)$ и их последствий, определяемых функцией полезности $U = U(d, \Phi)$.

Эта задача рассматривалась в работах [Хандожко, 2005; Вдовин, 1989], где представлена метеоролого-экономическая модель оптимизации использования среднесуточной температуры воздуха в теплоэнергетике.

Наиболее сложная часть решаемой задачи заключается в разработке правильной конструкции алгоритма расчета функции потерь $s = s(d, \Phi)$ как модификации функции полезности. Алгоритмизация численных процедур расчета содержит региональную погодоклиматическую составляющую и теплоэнергетическую специфику теплоисточника.

Использование прогностической информации и действий потребителя (диспетчера) может сопровождаться избыточным, отражающим перерасход тепла (Q_n) и недостаточным (Q_n) теплоснабжением. Функция тепловых потерь может быть представлена в общем виде следующим образом:

$$Q_n = \frac{\sigma_{\Delta Q}}{\sqrt{2\Pi}} \exp[-A] - Q_p' \frac{\Delta t_{np}}{t_n - t_p} \left[\frac{1}{2} - \Phi(A') \right], \quad (17)$$

$$Q_n = \frac{\sigma_{\Delta Q}}{\sqrt{2\Pi}} \exp[-B] + Q_p' \frac{\Delta t_{np}}{t_n - t_p} \left[\frac{1}{2} - \Phi(B') \right], \quad (18)$$

где Q_p' – тепловая мощность теплоисточника; $\sigma_{\Delta Q}$ – среднеквадратичное отклонение тепловых потерь (ΔQ) в системе теплоснабжения; $\Delta t_{np} = t_{np} - t_{\phi}$ – ошибка прогнозирования среднесуточной температуры воздуха; t_n – необходимая температура в помещении ($t_n = 18^\circ \text{C}$); t_p – расчетная температура воздуха – климатический показатель низких температур в данном пункте, используемый в проектировании тепловой мощности теплоисточника; A и B – показатели, отражающие тепловые потери в пределах «малых» ошибок прогнозирования; A' и B' – аналогично при условии «больших» ошибок; Φ – табулированная функция интеграла вероятностей.

Малые и большие ошибки прогнозирования рассматриваются с позиции теплотехнических допущений, т.е. имеют теплотехническую привязку.

Функция стоимостных потерь имеет вид:

$$S(\Delta t_{np}) = \Delta \tau [c_n Q_n + c_n Q_n], \quad (19)$$

где c_n – стоимость затрат на выработку тепла одной Гкал/ч; c_n – масштаб потерь при недодаче тепла, принимается $c_n = 3 c_n$.

Оценка экономической полезности возможна при расчете функции потерь $S(\Delta t_{np})$. Расчет её выполнен для ТЭЦ-21 Москвы при $Q_p' = 4603$ Гкал/ч (табл. 7).

На этом основании определялась матрица систематических потерь $\|\bar{R}_{kj}\|$, которая позволяет установить средние байесовские потери при стратегии доверия (\bar{R}_m) и оптимальной стратегии ($\bar{R}_{\text{опт}}$), обеспечивающей минимум тепловых и топливных потерь.

Таблица 7

Функция потерь (тыс. руб./сут.) для ТЭЦ-21 при $c_n = 400$ (руб. Гкал/ч)

c_n , руб./Гкал/ч	Ошибки прогноза $\Delta t_{пр}$ и функции потерь $S'(\Delta t_{пр})$										
	Перерасход тепла ($\Delta t_{пр}) < 0$					Недодача тепла ($\Delta t_{пр}) > 0$					
	-15	-12	-9	-6	-3	0	3	6	9	12	15
120	4519	3616	2700	1889	1233	1472	3023	5482	8076	10 846	13 558
400	15 060	12 052	9001	6296	4111	4907	10 076	18 274	26 920	36 154	45 199

Представленные здесь функции потерь $S'(\Delta t_{пр})$ записываются в матричном виде для расчета функции систематических потерь при известной матрице сопряженности прогнозов среднесуточной температуры воздуха [$n_{ij} = f(\Phi_i, P_j)$].

За отопительные периоды с 2003 по 2008 г. рассчитаны показатели экономической полезности – экономический эффект (\bar{t}) и экономическая эффективность (P) (табл. 8).

Таблица 8

Показатели экономической полезности прогнозов \bar{t} для ТЭЦ-21 Москвы за отопительные периоды 2003–2008 гг.

Величина c_n	\bar{t}_m , тыс. руб.	\bar{t}_{opt} , тыс. руб.	P_m	P_{opt}
120 руб./Гкал/ч	292 438	341 255	276	324
400 руб./Гкал/ч	805 584	1 139 230	759	1081

Как видим (табл. 8), использование прогностической информации (прогностических ресурсов) позволяет получить очень высокую экономическую полезность в работе теплоисточника (ТЭЦ-21). При оптимальной стратегии потребителя экономический эффект за отопительные периоды 2003–2008 гг. достигает более 340 млн руб. или 68 млн руб. за один отопительный период. Экономическая эффективность составляет 300 и более 1000 руб. на 1 рубль затрат на прогностическую информацию, разрабатываемую в Гидрометцентре Москвы.

Литература

1. Кендалл М.Дж., Стъарт А. Статистические выводы и связи. – М.: Наука, 1973. – 899 с.
2. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
3. Послание Президента России к Федеральному собранию от 05.11.2008.
4. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28.08.2003 № 1234-р «Энергетическая стратегия России на период до 2020 года».
5. Таушанова З., Тонеева Е., Пенова Р. Вычисление энтропийного коэффициента при малых выборках / Изобретательство, стандартизация и качество. – София, 1973, № 5.
6. Хандождко Л.А. Экономическая метеорология. – СПб.: Гидрометеиздат, 2005. – 490 с.
7. Хандождко Л.А., Вдовин В.Б. Функции метеорологических потерь теплоэлектростанций // Труды ГГО, 1989, вып. 528, с. 49–57.
8. Хандождко Л.А. Методические основы энерго- и ресурсосбережения в теплоэнергетике России // Метеоспектр, 2006, № 2, с. 93–103.
9. Heinhold J., Gaede K.W. Ingenieur statistic – Munchen: Wien, Springer Verlag, 1964. – 352 с.
10. Чупров А.А. Основные проблемы теории корреляции. О статистическом исследовании связи между явлениями. – М.: Госстатиздат, 1960.
11. Юдин М.И. Новые методы и проблемы краткосрочного прогноза погоды. – Л.: Гидрометеиздат, 1963. – 404 с.