

вающих относительную избыточную температуру, коэффициент теплоотдачи у внешней поверхности и теплопроводность материалов ограждения, используемых для расчета тел при граничных условиях III рода. Это подтверждается примером расчета, который показывает адекватность расчетных зависимостей термических сопротивлений экспериментальным результатам при определении сопротивления теплопроводности, полученного методом последовательных приближений.

ЛИТЕРАТУРА

1. З д а н и я и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций: ГОСТ 26254–84. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – С. 1–24.
2. М е т о д тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций: ГОСТ 26629–85. – Введ. 01.07.1986.
3. В р е м е н н ы й порядок измерительного контроля здания и сооружений на соответствие сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций нормативным требованиям // Строительный рынок. – 2003. – № 9. – С. 10–13.
4. Л ы к о в, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.
5. П е х о в и ч, А. И. Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. – Л.: Энергия, 1976. – 352 с.
6. Х р у с т а л е в, Б. М. Тепло- и массообмен / Б. М. Хрусталеv. – Минск: БНТУ, 2007. – 606 с.

Представлена кафедрой
теплогазоснабжения и вентиляции

Поступила 05.05.2010

УДК 621.1

РАСЧЕТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СТЕНКИ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Докт. техн. наук, проф. ЕСЬМАН Р. И.

Белорусский национальный технический университет

В специальных технологиях получения тонкостенных композиционных материалов значительный интерес представляют процессы нестационарного теплопереноса в многослойных стенках, имеющие нелинейный характер. При этом необходимо учитывать несимметричные условия теплообмена на поверхностях многослойной стенки, отдельные слои могут претерпевать фазовые превращения: плавление, затвердевание, сублимацию, испарение и т. д. Такие задачи приходится решать при подплавлении теплозащитных покрытий космических аппаратов, в процессах лазерной и плазменной обработки литых изделий с использованием эффекта скоростного затвердевания, при получении тонкостенных литых конструкций на подвижных кристаллизаторах.

Постановка задачи состоит в следующем. Рассмотрим элемент тонкостенной плоской заготовки прямоугольного сечения. Задачу решаем в дву-

мерной постановке, учитывая переменность теплофизических характеристик материала и нелинейные краевые условия.

В работе приведено численное решение задачи сложного теплообмена при получении пазогребневых плит в виде прямоугольного параллелепипеда в металлической форме. Ввиду двойной осевой симметрии можно ограничиться изучением тепловых процессов в плите и форме, расположенных в первой координатной четверти. При расчете учитывается зазор между формирующейся плитой и металлической формой, образованный слоем покрытия (масляной эмульсией) и газовой прослойки, обусловленной усадкой вяжущего материала и термическими деформациями металлической формы.

Пусть размеры четверти формы $a \times b$, а четверти плиты $a_0 \times b_0$.

Поле температур в плите и форме описывается дифференциальными уравнениями:

$$c_1(T_1)\rho_1(T_1)\frac{\partial T_1(x,y,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda_1(T_1)\frac{\partial T_1(x,y,t)}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda_1(T_1)\frac{\partial T_1(x,y,t)}{\partial y}\right]; \quad (1)$$

$$c_2(T_2)\rho_2(T_2)\frac{\partial T_2(x,y,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda_2(T_2)\frac{\partial T_2(x,y,t)}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda_2(T_2)\frac{\partial T_2(x,y,t)}{\partial y}\right], \quad (2)$$

где $c_1, \rho_1, \lambda_1, T_1, c_2, \rho_2, \lambda_2, T_2$ – теплофизические характеристики и температуры плиты и формы соответственно.

Уравнение (1) решается в прямоугольной области ($0 \leq x \leq a_0; 0 \leq y \leq b_0$), а (2) – в сложной области в виде угла, получаемой при вычитании из области ($0 \leq x \leq a; 0 \leq y \leq b$) области, занятой плитой.

Сформулируем граничные и контактные условия. Исходя из условий сопряжений, контактные условия ставятся на общей границе плиты и формы.

Рассматривая теплоотдачу от плиты к форме через двухслойную стенку (воздух + покрытие) по аналогии с одномерной задачей граничные условия можно записать в виде:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \frac{[T_1(y,t) - T_2(y,t)] \left[\frac{\lambda_{\text{в}}}{\delta(y,t)} + \alpha_{\text{л}}(y,t) \right] \frac{\lambda_{\text{покр}}}{\delta_{\text{покр}}}}{\frac{\lambda_{\text{покр}}}{\delta_{\text{покр}}} + \frac{\lambda_{\text{в}}}{\delta(y,t)} + \alpha_{\text{л}}(y,t)} \quad (3)$$

при $x = a_0; 0 \leq y \leq b_0;$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = \frac{[T_1(x,t) - T_2(x,t)] \left[\frac{\lambda_{\text{в}}}{\delta(x,t)} + \alpha_{\text{л}}(x,t) \right] \frac{\lambda_{\text{покр}}}{\delta_{\text{покр}}}}{\frac{\lambda_{\text{покр}}}{\delta_{\text{покр}}} + \frac{\lambda_{\text{в}}}{\delta(x,t)} + \alpha_{\text{л}}(x,t)} \quad (4)$$

при $y = b_0$; $0 \leq x \leq a_0$,

где $\lambda_{\text{покр}}$, $\lambda_{\text{в}}$ – теплопроводность покрытия и воздуха; $\delta(x, t)$ – зазор в контакте $y = b_0$ в момент времени t ; $\delta(y, t)$ – зазор в контакте $x = a_0$ в момент времени t ;

$$\alpha_{\text{л}} = \varepsilon_{1/2} \sigma (T_1 + T_{\text{покр}})(T_1^2 + T_{\text{покр}}^2), \quad (5)$$

где $T_{\text{покр}}$ – температура поверхности покрытия, смежной с плитой, определяется следующим образом:

$$T_{\text{покр}} = \frac{T_2 \frac{\lambda_{\text{покр}}}{\delta_{\text{покр}}} + T_1 \left(\frac{\lambda_{\text{в}}}{\delta} + \alpha_{\text{л}} \right)}{\frac{\lambda_{\text{покр}}}{\delta_{\text{покр}}} + \frac{\lambda_{\text{в}}}{\delta} + \alpha_{\text{л}}}. \quad (6)$$

Значения T_1 , T_2 и δ берутся в соответствующей точке контактной поверхности, в которой определяются $T_{\text{покр}}$ и $\alpha_{\text{л}}$.

Напомним, что при записи (3) и (4) учитывали только процесс теплопроводности через покрытие и процесс теплопроводности и теплоизлучения через слой воздуха. Процессом конвекции в зазоре пренебрегаем.

Продолжим формулировку граничных условий. На осях симметрии можно записать:

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0 \quad \text{при } y = 0;$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial y} = \frac{\partial T_2}{\partial y} = 0 \quad \text{при } x = 0.$$

Предполагая, что теплообмен с наружной поверхности формы можно представить по закону Ньютона, будем иметь:

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \alpha(T_2 - T_{\infty}) \quad \text{при } x = a;$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = \alpha(T_2 - T_{\infty}) \quad \text{при } y = b,$$

где T_{∞} – температура внешней среды; α – коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности формы.

Коэффициент α определяется способом охлаждения наружной поверхности формы.

При свободном охлаждении формы в безграничном пространстве коэффициент α характеризует собой теплоотдачу свободной конвекцией и излучением $\alpha = \alpha_k + \alpha_l$:

$$\alpha_k = f(\text{Gr}, \text{Pr});$$

$$\alpha_l = \varepsilon \sigma (T_2^2 + T_\infty^2)(T_2 + T_\infty).$$

При вынужденном охлаждении формы

$$\alpha = f(\text{Re}, \text{Pr}),$$

причем число Re определяют по толщине охлаждающей рубашки формы.

Начальные условия для уравнений (1), (2) запишутся:

$$T_1(x, y, 0) = T_{1_0};$$

$$T_2(x, y, 0) = T_{2_0},$$

где T_{1_0} – температура заливки; T_{2_0} – начальная температура равномерно прогретой формы.

Выберем в качестве характерного размера длину формы a , а в качестве характерной температуры температуру окружающей среды $T_0 = T_\infty$. Перепишем задачу в безразмерных переменных:

$$a^2 c_1 \rho_1 \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1 \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_1 \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (7)$$

при $0 \leq x \leq \bar{a}_0$; $0 \leq y \leq \bar{b}_0$;

$$a^2 c_2 \rho_2 \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_2 \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (8)$$

при $0 \leq x \leq 1$; $b_0 \leq y \leq \bar{b}$; $\bar{a}_0 \leq x \leq 1$; $0 \leq y \leq b_0$;

$$-\lambda_1 \frac{\partial u}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial v}{\partial x} = - \frac{(u-v) \left(\frac{\lambda_v}{\delta} + \alpha_l \right) \frac{\lambda_{\text{покр}}}{\delta_{\text{покр}}} a}{\frac{\lambda_{\text{покр}}}{\delta_{\text{покр}}} + \frac{\lambda_v}{\delta} + \alpha_l} \quad (9)$$

при $x = \bar{a}_0$; $0 \leq y \leq \bar{b}_0$;

$$-\lambda_1 \frac{\partial u}{\partial y} = -\lambda_2 \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{(u-v) \left(\frac{\lambda_v}{\delta} + \alpha_l \right) \frac{\lambda_{\text{покр}}}{\delta_{\text{покр}}} a}{\frac{\lambda_{\text{покр}}}{\delta_{\text{покр}}} + \frac{\lambda_v}{\delta} + \alpha_l} \quad (10)$$

при $x = b_0$; $0 \leq x \leq 1$.

В уравнениях (9), (10): $\delta_{\text{покр}} \neq 0$; $\delta \neq 0$.

При $\delta = 0$; $\delta_{\text{покр}} \neq 0$ их следует заменить на условия соответственно:

$$-\lambda_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} = (u - v) \frac{\lambda_{\text{покр}}}{\delta_{\text{покр}}} a;$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} = -\lambda_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} = (u - v) \frac{\lambda_{\text{покр}}}{\delta_{\text{покр}}} a;$$

при $\delta_{\text{покр}} = 0$; $\delta \neq 0$:

$$-\lambda_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} = (u - v) \left(\frac{\lambda_{\text{в}}}{\delta} + \alpha_{\text{л}} \right) a; \quad (11)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} = -\lambda_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} = (u - v) \left(\frac{\lambda_{\text{в}}}{\delta} + \lambda_{\text{л}} \right) a; \quad (12)$$

наконец, при $\delta_{\text{покр}} = 0$ и $\delta = 0$ будем иметь:

$$\lambda_1 \frac{\partial u}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial v}{\partial x}, \quad u = v;$$

$$\lambda_1 \frac{\partial u}{\partial y} = \lambda_2 \frac{\partial v}{\partial y}, \quad u = v.$$

В период фазового перехода уравнение (1) распадается на два, описывающие теплопроводность в жидкой и твердой фазах с добавлением условий на границе раздела фаз ξ :

$$\lambda_{1T} \text{grad}(T_1) \Big|_{\xi+0} - \lambda_{1ж} \text{grad}(T_1) \Big|_{\xi-0} = -\tilde{r} \tilde{\rho} \frac{d\xi}{dt}.$$

Вводя в рассмотрение δ -функцию и разрывные теплофизические коэффициенты, процесс фазового перехода можно описать с помощью одного уравнения

$$\rho_1 \left[c_1 + r \delta(T_1 - T_{\phi}) \right] \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \right), \quad (13)$$

$$\text{где } \rho_1, c_1, \lambda_1 = \begin{cases} \rho_{1T}, c_{1T}, \lambda_{1T} & \text{при } T_1 < T_{\phi}; \\ \rho_{1ж}, c_{1ж}, \lambda_{1ж} & \text{при } T_1 > T_{\phi}. \end{cases}$$

Решение (13) производят путем сглаживания δ -функции и теплофизических коэффициентов, осуществляя замену фронта фазового перехода на некоторую его область ($T_{\phi} - \Delta$; $T_{\phi} + \Delta$).

Для записи конечно-разностных уравнений используем шеститочечный шаблон (рис. 1).

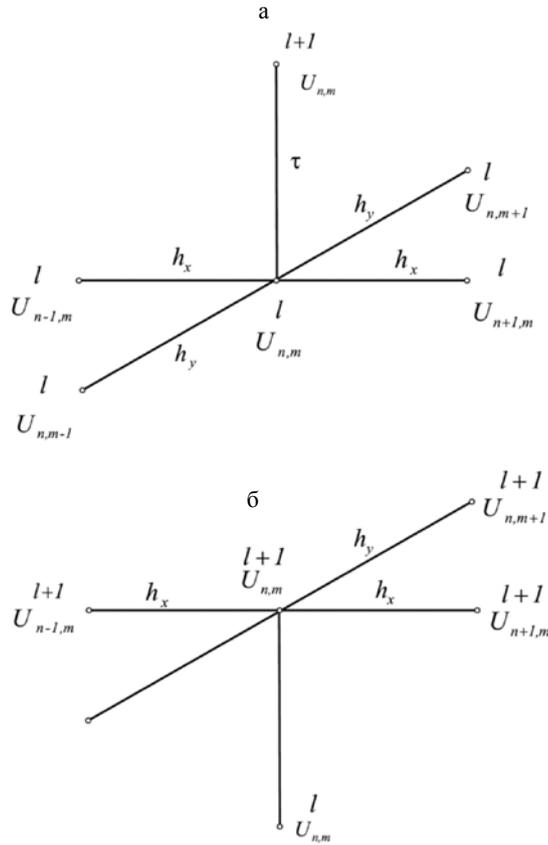


Рис. 1. а – шеститочечный шаблон по явной; б – неявной схемам

Условия на границе раздела:

$$\kappa_j = \frac{\frac{\lambda_{\text{покр}}}{\delta_{\text{покр}}} a \left(\frac{\lambda_{\text{в}}}{\delta_j} + \alpha_{\text{л}_j} \right)}{\frac{\lambda_{\text{покр}}}{\delta_{\text{покр}}} + \frac{\lambda_{\text{в}}}{\delta_{\text{в}}} + \alpha_{\text{л}_j}} \quad \text{при } \delta_{\text{покр}} \neq 0 \text{ и } \delta_{\text{в}} \neq 0; \quad (14)$$

$$\kappa_j = \frac{\lambda_{\text{покр}}}{\delta_{\text{покр}}} a \quad \text{при } \delta_{\text{покр}} \neq 0, \quad \delta = 0;$$

$$\kappa_j = \frac{\lambda_{\text{в}}}{\delta_j} + \alpha_{\text{л}_j} \quad \text{при } \delta_{\text{покр}} = 0, \quad \delta \neq 0.$$

Соответствующие формулы могут быть записаны для κ_i . Величины $\alpha_{\text{л}_i}$ и $\alpha_{\text{л}_j}$ определяются по температуре в контакте на предыдущем временном слое

$$\alpha_{\text{л}_i} = \varepsilon_{1/2} \sigma T_0^3 \left[\left(\frac{u_{i,M_2}^l + u_{i,M_2-1}^l}{2} + 1 \right)^2 + (u_{\text{покр}_i} + 1)^2 \right] \times$$

$$\times \left(\frac{u'_{i,M_2} + u'_{i,M_2-1}}{2} + u_{\text{покр}_i} + 2 \right), \quad (15)$$

где $u_{\text{покр}_i}$ – безразмерная температура наружной поверхности краски;

$$u_{\text{покр}_i} = \frac{\frac{v'_{i,M_2} + v'_{i,M_2-1}}{2} \frac{\lambda_{\text{покр}}}{\delta_{\text{покр}}} + \frac{u'_{i,M_2} + u'_{i,M_2-1}}{2} \left(\frac{\lambda_{\text{в}}}{\delta_i} + \alpha_{\text{л}_i} \right)}{\frac{\lambda_{\text{покр}}}{\delta_{\text{покр}}} + \frac{\lambda_{\text{в}}}{\delta} + \alpha_{\text{л}_i}}. \quad (16)$$

Уравнения (15), (16) следует рассматривать как трансцендентные для определения $\alpha_{\text{л}_i}$, $u_{\text{покр}_i}$, которые решаются методом половинного деления.

При $\delta_{\text{покр}} = 0$ (15) необходимо заменить на

$$\alpha_{\text{л}_i} = \varepsilon_{1/2} \sigma T_0^3 \left[\left(\frac{u'_{i,M_2} + u'_{i,M_2-1}}{2} + 1 \right)^2 + \left(\frac{v'_{i,M_2} + v'_{i,M_2-1}}{2} + 1 \right)^2 \right] \times \left(\frac{u'_{i,M_2} + u'_{i,M_2-1}}{2} + \frac{v'_{i,M_2} + v'_{i,M_2-1}}{2} + 2 \right). \quad (17)$$

Выражения для вычисления $\alpha_{\text{л}_j}$, $u_{\text{покр}_j}$ составляются по аналогии с (15)–(17).

Действительные величины δ_j и δ_i считаются равными нулю, если соответствующие температуры плиты $(u_{i,M_2} - u_{i,M_2-1})/2$ и $(u_{M_1,j} + u_{M_1-1,j})/2$ больше или равны температуре затвердевания. В противном случае зазоры δ_j и δ_i определяются как остаточные деформации формы с использованием приведенных выше уравнений.

Аппроксимацию остальных граничных и начальных условий можно записать так:

$$\left. \begin{aligned} u_{0,j}^{l+1} &= u_{-1,j}^{l+1} \quad \text{при } j = -1, 0, 1, \dots, M_2; \\ v_{0,j}^{l+1} &= v_{-1,j}^{l+1} \quad \text{при } j = M_2, M_2 + 1, \dots, N_2; \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{i,0}^{l+1} &= u_{i,-1}^{l+1} \quad \text{при } i = -1, 0, 1, \dots, M_1; \\ v_{i,0}^{l+1} &= v_{i,-1}^{l+1} \quad \text{при } i = M_1, M_1 + 1, \dots, N_1; \end{aligned} \right\}$$

$$-\lambda_{N_1-\frac{1}{2},j}^{(2)} \frac{v_{N_1,j}^{l+1} - v_{N_1-1,j}^{l+1}}{h_1} = \alpha_j a \frac{v_{N_1,j}^{l+1} + v_{N_1-1,j}^{l+1}}{2},$$

где $j = -1, 0, \dots, N_2$;

$$-\lambda_{i,N_2-\frac{1}{2}}^{(2)} \frac{v_{i,N_2}^{l+1} - v_{i,N_2-1}^{l+1}}{h_2} = \alpha_i a \frac{v_{i,N_2}^{l+1} + v_{i,N_2-1}^{l+1}}{2}, \quad (19)$$

где $i = -1, 0, \dots, N_1$;

$$u_{i,j}^0 = u_0, \quad (20)$$

где $i = -1, 0, \dots, M_1$; $j = -1, 0, \dots, M_2$;

$$v_{i,j}^0 = v_0,$$

где $i = M_1, M_1 + 1, \dots, N_1$; $j = -1, 0, \dots, M_2$ или $i = -1, 0, \dots, N_1$; $j = M_2, M_2 + 1, \dots, N_2$.

Выражения (18), (19) с учетом (20) дают $(N_1 + 2)(N_2 + 2) + 2(M_1 + M_2)$ алгебраических линейных уравнений для определения такого же количества неизвестных значений температур в узлах сетки. На каждом временном шаге $(\partial + 1)\tau$, $l = 0, 1, \dots$ их решение производится по методу продольно-поперечных направлений.

Представленная в данной работе математическая модель процессов нестационарной теплопроводности с учетом движущегося фронта фазовых превращений в быстротвердеющем гипсовом растворе использована для численного эксперимента и анализа полей температур и температурных напряжений гипсовых плит и металлических форм в процессе производства изделий.

ВЫВОДЫ

По результатам численного эксперимента определен характер распределения температур в сечении многослойной стенки, который определяется геометрическими соотношениями и термическим сопротивлением отдельных слоев стенки. При наличии слоя с фазовыми и химическими превращениями теплота поглощается в основном данным слоем. Температурное поле многослойной стенки в определенной степени зависит также от тепловых условий на поверхностях стенки. Из анализа температурного поля выявлена роль начальных параметров и толщин отдельных слоев стенки.

Набор материалов отдельных слоев обусловлен функциональными особенностями стенки (прочностными, термо- и жаростойкими, антикоррозионными и т. д.) и зависит от эксплуатационных свойств изделий, их служебного назначения.

Универсальность разработанной математической модели и численного метода решения позволяет рассчитывать многослойные изделия с заданными служебными характеристиками для различных отраслей народного хозяйства (энергетической, нефтехимической, машино- и приборостроительной и т. д.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Е с ь м а н, Р. И. Расчеты процессов литья / Р. И. Есьман, Н. П. Жмакин, Л. И. Шуб. – Минск: Вышэйш. шк., 1977. – 264 с.
2. Е с ь м а н, Р. И. Термогидравлика при бурении скважин / Р. И. Есьман. – М.: Недра, 1982. – 247 с.
3. П о л я н и н, А. Д. Методы решения нелинейных уравнений математической физики и механики / А. Д. Полянин, В. Ф. Зайцев, А. И. Журов. – М.: Физматлит, 2005. – 256 с.

Представлена кафедрой
промышленной теплоэнергетики
и теплотехники

Поступила 10.03.2010

УДК 536.242.08

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРНОЙ НАДЕЖНОСТИ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Докт. техн. наук КЕЛБАЛИЕВ Р. Ф., инж. РАГИМОВ Ф. А.

*АзНИПИИ энергетики,
Азербайджанская государственная нефтяная академия*

В современных условиях основная часть электроэнергии вырабатывается на тепловых электрических станциях. Одна из актуальных проблем при производстве электроэнергии – повышение коэффициента полезного действия ТЭС и уменьшение расхода топлива. Кардинальным средством повышения КПД ТЭС является увеличение начальных параметров пара, поступающего в турбину. В указанных условиях увеличивается термический КПД турбинной установки, соответственно повышается КПД ТЭС и уменьшается расход топлива на выработку электроэнергии.

Значительное влияние начальных и конечных параметров пара на удельную выработку электроэнергии отмечалось неоднократно. Так, из расчета экономической эффективности, проведенного в [1] для энергоблока К-800-240, видно, что удельный расход теплоты снижается при повышении давления и температуры свежего пара. С ростом давления свежего пара повышается давление и в нерегулируемых отборах турбины, увеличивается регенеративный подогрев питательной воды, что оценивается как экономия теплоты. При этом в таких энергоблоках с турбиной К-800-240 расход топлива уменьшается.

С учетом результатов экономической эффективности при повышении параметров пара в европейских странах были созданы и эксплуатируются энергоблоки на «суперкритических» параметрах пара [2]. В таких энергоблоках КПД составляет 47–53 %.