

ТРЕХМЕРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ПО ТЕХНОЛОГИИ ВЫСШЕГО УРОВНЯ

**Канд. техн. наук, доц. БОЛОТОВ В. Ю., асп. ПАВЛЮЧЕНКОВ О. И.,
докт. техн. наук, проф. ТИМОШПОЛЬСКИЙ В. И.,
канд. техн. наук ФИЛИППОВ В. В.,
инж. ГУЛЯЕВ М. П., канд. техн. наук ШЕВЧЕНКО А. Д., асп. ГРИБОК Д. К.**

*Днепродзержинский государственный технический университет (Украина),
Белорусская государственная политехническая академия,
Республиканское унитарное предприятие «Белорусский металлургический завод»*

В современном металлургическом производстве дуговые сталеплавильные печи (ДСП) рассматриваются как высокопроизводительные агрегаты для выплавки полупродукта при обеспечении условий работы печи для максимально возможного ускорения процесса плавки и достижения минимизации энергопотребления. Каждый элемент технологии высшего уровня выплавки и внепечной доводки стали будет давать различный эффект в зависимости от других элементов, уже используемых на агрегате. В связи с этим актуальной задачей для металлургии является исследование взаимовлияния различных технологических параметров на процесс выплавки и внепечной доводки металла, поскольку взаимоучет всех технологических аспектов может дать более полный эффект как в производительности, так и в ресурсо- и энергосбережении в электросталеплавильном производстве. Поэтому вопросы реконструкции ДСП и оптимизации режимов с точки зрения энергосбережения должны рассматриваться с учетом условий работы и конструктивных возможностей конкретных печных энергетических агрегатов [1–4].

Проблема перегрева расплава в зоне действия электрической дуги при выплавке стали в мощных печах постоянно находится в центре внимания исследований электросталеплавильщиков. Поскольку нагрев в ДСП осуществляется сверху, в ванне существует лишь незначительная естественная конвекция. Движение металла, вызываемое электродинамическим воздействием дуг, несколько повышает конвекцию, но обычно этого недостаточно для устранения неравномерности металла по составу и температуре. Для получения чистой по неметаллическим включениям стали с низким содержанием газов, быстрой и эффективной гомогенизации и ускорения тепло- и массообменных процессов при выплавке используют донную продувку инертными газами в печи. При донном перемешивании ванна гомогенизируется, вследствие лучшего контакта на границе шлак–металл увеличивается скорость химических реакций. Наряду с улучшением качества стали, донная продувка инертными газами в печи снижает расход электроэнергии и электродов, раскислителей и легирующих, увеличивает производительность печной установки [3–5].

Существенное влияние на высокопроизводительную работу высокопроизводительной ДСП оказывает рациональная организация периода плавления. Быстрое расплавление металлической шихты обеспечивается не только высокой мощностью печного трансформатора и перемешиванием металла

инертным газом в процессе выплавки, но и правильным выбором режима плавки с применением дополнительного альтернативного источника теплоты [6–8].

В [5] показано, что технология производства стали в дуговой сталеплавильной печи характеризуется тем, что одновременно с увеличением подводимой электрической мощности необходимо повышать потребление других источников энергии, доля которых в настоящее время в энергетическом балансе печи составляет 25–40 %. Рациональное применение топливно- и газокислородных горелок улучшает показатели работы мощных ДСП, что обуславливает их применение в современных электросталеплавильных печах [8].

Процесс выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи в тепловом аспекте состоит из двух этапов – проплавления колодцев и расплавления шихты. Особенность проплавления колодцев связана с тем, что скорость их образования не может однозначно определяться традиционными характеристиками: мощностью трансформатора, энергией топливно-кислородных горелок и т. п. Поскольку проплавление колодцев процесс динамичный (опускание электродов за плавящейся шихтой происходит с изменением размеров колодца), выбрать оптимальный электрический режим без учета теплофизических свойств шихты невозможно. Динамика проплавления шихты в значительной мере определяется ее насыпной плотностью и пористостью. В начале нагрева и проплавления колодцев энергия от электрических дуг передается шихте излучением, конвекцией с горячими газами и теплопроводностью от наиболее раскаленных участков металла в зоне пятна дуги. По мере проплавления колодца излучение дуг экранируется стенками колодца и энергия, выделяемая ими, практически полностью передается шихте. Прогрев шихты осуществляется посредством теплопроводности и конвекции отходящих печных газов. По мере нагрева и плавления шихта оседает так, что в печи между сводом и ею образуется свободное пространство.

В отличие от работ [9–11], в которых не учитывалась аргонная продувка жидкой фазы металла, ниже приведена комплексная математическая модель, включающая уравнения теплопереноса и гидродинамики. Трехмерное уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах с источниками теплоты запишется

$$\begin{aligned}
 & c_{\text{эф}}(T, r, \varphi, z) \rho(T, r, \varphi, z) \frac{\partial T(r, \varphi, z, \tau)}{\partial \tau} + v_r \frac{\partial T(r, \varphi, z, \tau)}{\partial r} + \\
 & + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial T(r, \varphi, z, \tau)}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial T(r, \varphi, z, \tau)}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(T, r, \varphi, z) r \frac{\partial T(r, \varphi, z, \tau)}{\partial r} \right) + \\
 & + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda(T, r, \varphi, z) \frac{\partial T(r, \varphi, z, \tau)}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T, r, \varphi, z) \frac{\partial T(r, \varphi, z, \tau)}{\partial z} \right) + \\
 & + Q_{\text{гор}}(\tau, r, \varphi, z) + Q_{\text{экз}}(\tau) + Q_{\text{к}}(r, \varphi, z, \tau),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где r, φ, z – цилиндрические координаты; $T(r, \varphi, z, \tau)$ – температура шихты или «болота», °C; $\lambda(T, r, \varphi, z)$ – теплопроводность шихты или «болота», Вт/(м·°C); $\rho(T, r, \varphi, z)$ – плотность шихты или «болота», кг/м³; v_r, v_φ, v_z –

компоненты вектора скорости течения жидкого металла при продувке (в областях, где шихта не расплавлена, равны нулю), м/с; $Q_{гор}(\tau, r, \varphi, z)$ – объемный источник теплоты, выделяемой за счет работы газокислородных горелок, Вт/м³; $c_{эф}(T, r, \varphi, z)$ – эффективная теплоемкость, Дж/(кг·°С), учитывающая выделение теплоты фазового перехода в интервале температур солидус T_S – ликвидус T_L и определяемая по формуле [9]

$$c_{эф} = \begin{cases} c_{тв}(T), T < T_S; \\ c_{тв}(T) - \frac{Q}{T_L - T_S}, T_S \leq T < T_L; \\ c_{ж}(T), T \geq T_L, \end{cases} \quad (2)$$

где $c_{тв}$ и $c_{ж}$ – теплоемкости соответственно твердой и жидкой фаз; Q – теплота фазового перехода в интервале температур солидуса и ликвидуса, Дж/кг.

Коэффициент теплопроводности для шихты определяется согласно [9, 10] по зависимости

$$\lambda(T, r, \varphi, z) = \lambda_{тв} \frac{\rho}{\rho_{тв}} + \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{тв}}\right) (\alpha_V + 4\varepsilon\sigma_0\delta(T + 273)^4), \quad (3)$$

где ρ – насыпная плотность шихты; $\rho_{тв}$ – плотность твердой шихты; ε – степень черноты поверхности материалов шихты; σ_0 – постоянная Стефана–Больцмана; δ – среднее расстояние между центрами кусков шихты; α_V – объемный коэффициент теплоотдачи; $\lambda_{тв}$ – коэффициент теплопроводности твердой шихты.

В остатке металла от предыдущей плавки («болоте») коэффициент теплопроводности принимает значение $\lambda_{тв}$ при температуре ниже солидуса металла и $\lambda_{ж}$ – при температуре выше ликвидуса металла. В интервале температур солидус–ликвидус «болота» коэффициент теплопроводности $\lambda_{тв}$ будет иметь промежуточные значения, пропорциональные доле твердой фазы в двухфазной зоне. Плотность материалов в объеме печи $\rho(T, r, \varphi, z)$ может принимать значения насыпной плотности лома $\rho_{лом}$, окатышей $\rho_{ок}$, твердой $\rho_{тв}$, жидкой $\rho_{ж}$ фаз «болота» или промежуточное значение $\rho_{пр}$.

Теплота внутренних источников в твердой фазе шихты определяется химическими реакциями и в зависимости от стадии расплавления может иметь различный знак, однако в среднем за период расплавления преобладают экзотермические реакции. Внутренние источники образования массы и теплоты во внутреннем пространстве печи распределяются неравномерно, особенно в начальный период. Основной внутренний источник образования газа локализован в плавильной зоне или на конце электродов. При известном тепловом эффекте и массе окисляемого элемента значение выделенной при окислении теплоты можно легко определить. Прогрев рас-

плава за счет выделяющейся теплоты экзотермических реакций учитывается введением в уравнение (1) источникового члена $Q_{\text{экз}}$, который распределяется по всему объему, принимает постоянное значение и начинает действовать при определенной температуре (при достижении шихтой температуры плавления в любой точке).

Дополнительный подогрев шихты печными газами учитывается в математической модели источниковым членом в (1), который вводится в предположении о квазистационарности межфазного теплообмена в шихте

$$Q_{\kappa} = \alpha_{\nu} (T_r(r, \varphi, z, \tau) - T(r, \varphi, z, \tau)). \quad (4)$$

Температура печных газов $T_r(r, \varphi, z, \tau)$ принимается в модели равной температуре поверхностных слоев жидкой фазы шихты [9].

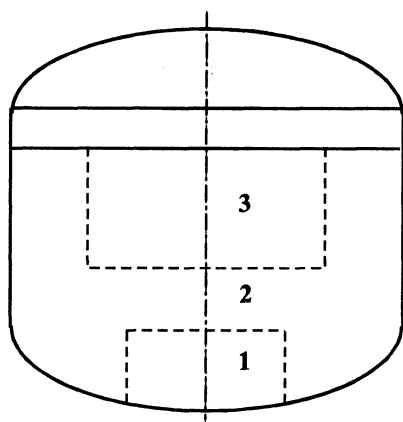


Рис. 1. Области характерного влияния газа на теплообмен в шихте

В [9] детально изучено влияние газа на теплообмен в шихте. При проведении вычислительного эксперимента авторами указанной работы установлены три характерные области в пространстве печи (рис. 1):

1 – область у входа газа в шихту с малыми перепадами температур между шихтой и газом ($\approx 1^\circ\text{C}$) и α_{ν} – до $250 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$;

2 – область характеризуется несколько большими перепадами температур ($\approx 2\text{--}3^\circ\text{C}$) и значительно меньшими коэффициентами межфазного теплообмена ($10\text{--}100 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$). Объемная плотность внутренних источников в обоих случаях примерно одинакова и невелика;

3 – область интенсивного нагрева, где плотность внутренних источников гораздо выше, α_{ν} достигает $70\text{--}300 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ и разность температур может достигать 1000°C .

При рассмотрении теплообмена в шихте переносом теплопроводности в газе можно пренебречь [10].

Учет ввода альтернативной теплоты за счет работы газокислородных горелок проводится за счет источникового члена $Q_{\text{гор}}(r, \varphi, z, \tau)$. Начальными условиями для (1) является поле температур для «болота» и шихты. При этом может быть учтен предварительный прогрев лома отходящими печ-

ными газами. Граничными условиями для (1) являются условия конвективного теплообмена на боковой стенке печи, днище печи и поверхности шихты:

$$-\lambda(T, r, \varphi, z) \frac{\partial T(r, \varphi, z, \tau)}{\partial \bar{n}} = \alpha_{\text{ст}} (T(r, \varphi, z, \tau) - T_{\text{ф}}); \quad (5)$$

$$-\lambda(T, r, \varphi, z) \frac{\partial T(r, \varphi, z, \tau)}{\partial \bar{n}} = \alpha_{\text{дн}} (T(r, \varphi, z, \tau) - T_{\text{ф}}); \quad (6)$$

$$-\lambda(T, r, \varphi, z) \frac{\partial T(r, \varphi, z, \tau)}{\partial \bar{n}} = \alpha_{\text{верх}} (T(r, \varphi, z, \tau) - T_{\text{среды}}), \quad (7)$$

где $\alpha_{\text{ст}}$, $\alpha_{\text{дн}}$, $\alpha_{\text{верх}}$ – коэффициенты теплоотдачи от боковых стенок, днища печи и верхней поверхности шихты соответственно. Значения данных коэффициентов теплоотдачи и температуры футеровки детально описаны в [12].

В зоне пятна дуги на поверхности жидкого металла задано граничное условие радиационного теплообмена

$$-\lambda(T, r, \varphi, z) \frac{\partial T(r, \varphi, z, \tau)}{\partial z} = \varepsilon_{\text{м}} \sigma_0 (T_{\text{дуги}} + 273)^4 - (T(r, \varphi, z, \tau) + 273)^4, \quad (8)$$

где $\varepsilon_{\text{м}}$ – степень черноты поверхности металла;

$T_{\text{дуги}}$ – температура электрической дуги, °С.

Плотность шихты $\rho(T, r, \varphi, z)$ в начале плавки принимается постоянной по объему, а затем, в ходе плавления и перетекания металла, изменяется. Все элементы шихты в ее верхней части с удельной энтальпией, превышающей энтальпию расплавленного металла в точке фазового перехода, исключаются, а их массы и энтальпии передаются нижележащим слоям. В результате шихта в нижней части имеет слои жидкого металла, в верхней – первоначальную плотность, между этими частями находится промежуточный слой, т. е. ρ соответствуют значения: 0 – при отсутствии шихты, $\rho_{\text{тв}}$ – твердый металл, $\rho_{\text{ж}}$ – жидкий металл, $\rho_{\text{пр}}$ – промежуточная плотность между плотностями твердого и жидкого металла. Количество металла, размещаемое ниже расплавленной ячейки, вычисляется с учетом пористости шихты. Энтальпии элементов пересчитываются исходя из теплового баланса

$$h' = \frac{\rho h + M(\rho_{\text{ж}} - \rho)h_{\text{ж}} / M_{\text{ж}}}{\rho + M(\rho_{\text{ж}} - \rho) / M_{\text{ж}}}, \quad (9)$$

где h , M – энтальпия и масса жидкого металла;

h' и h – новые и старые значения энтальпии данного элемента;

ρ – текущее значение плотности элемента.

При разработке математической модели, описывающей гидродинамическую картину в металлической ванне в период ее аргонной продувки, принимаются следующие допущения:

- согласно работе [13], выдвигается предположение о сплошности единой газожидкостной среды, являющейся стратифицированной по плотности вязкой несжимаемой жидкостью;
- основным фактором, влияющим на характер движения единой газожидкостной среды, является подъемная сила, возникающая из-за неоднородности по плотности, которая обусловлена наличием газовых включений;
- предполагается, что коэффициент газосодержания явным образом зависит лишь от пространственной точки и времени;
- на свободной поверхности жидкого металла не происходит никаких волновых процессов, т. е. поверхность металла гладкая;
- если свободная поверхность жидкого металла отсутствует (шихта над «болотом» не успела расплавиться), то на границе жидкий металл–твердая шихта принимается условие прилипания.

Стационарное течение единой газожидкостной среды, возникающее при продувке металлической ванны, в силу введенных предположений описывается системой нестационарных уравнений Навье–Стокса в приближении Буссинеска при $\tau \rightarrow \infty$ [14]:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial \tau} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho_0} \text{grad} P + \nu \Delta \vec{V} + (1 - \bar{\alpha}) \vec{g}; \quad (10)$$

$$\frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \tau} + (\vec{V} \cdot \nabla) \bar{\alpha} = 0; \quad (11)$$

$$\text{div} \vec{V} = 0. \quad (12)$$

Здесь \vec{V} – вектор скорости жидкости, имеющий следующие компоненты в направлении ортов r_c, φ_c, z_c системы координат – $\{v_r, v_\varphi, v_z\}$ и определяемый как отношение плотности импульса среды $\bar{\pi}$ к массовой плотности $\vec{V} = \bar{\pi}/\rho$;

$\nu = \mu/\rho_0$ – эффективный коэффициент кинематической вязкости жидкой среды, учитывающий турбулентный характер ее движения;

$\rho = \rho_0(1 - \bar{\alpha})$ – плотность единой газожидкостной среды;

ρ_0 – плотность жидкости;

$\bar{\alpha}$ – объемная доля газа в газожидкостной среде.

Начальным условием является равенство нулю скоростей газожидкостной среды и объемной доли газовой фазы во всем объеме жидкого металла:

$$\vec{V}(r_c, \varphi_c, z_c, \tau = 0) = 0; \quad (13)$$

$$\bar{\alpha}(r_c, \varphi_c, z_c, \tau = 0) = 0. \quad (14)$$

Граничные условия для вектора скорости на стенках, днище печи и на границе жидкий металл–твердая шихта (если свободная поверхность жидкого металла отсутствует) ставятся из условий непротекания и прилипания:

$$\vec{V} \cdot \vec{n} = 0; \quad (15)$$

$$\vec{V}_{\parallel} = 0, \quad (16)$$

где \vec{n} – единичный вектор нормали к поверхности, а на свободной поверхности – из условий непротекания и свободного скольжения:

$$\vec{V} \cdot \vec{n} = 0; \quad (17)$$

$$\nabla \vec{V}_{\parallel} \cdot \vec{n} = 0. \quad (18)$$

Граничные условия для вектора скорости в барботажной зоне формулируются из условий отсутствия завихренности и отсутствия горизонтального перемещения среды [15]:

$$\frac{\partial v_z}{\partial r} = 0; \quad (19)$$

$$v_{\varphi} = 0; \quad (20)$$

$$v_r = 0. \quad (21)$$

На твердой стенке, днище печи и на границе жидкий металл–твердая шихта (если свободная поверхность жидкого металла отсутствует) на коэффициент газосодержания налагается условие непротекания

$$\nabla \bar{\alpha} \cdot \vec{n} = 0, \quad (22)$$

на свободной поверхности и в зоне барботажа – условие свободного протекания

$$\bar{\alpha} = A, \quad (23)$$

причем на свободной поверхности $A = 0$, а в зоне барботажа – $A = 1$ [15].

Граничные условия для давления получаются проектированием уравнения движения (10) на соответствующие орты [14].

Исследование турбулентного характера переноса количества движения в уравнениях движения проводится по двухпараметрическому методу [14] введением эффективного коэффициента вязкости, включающего аппроксимационную и турбулентную составляющие

$$v = v_m + \frac{\Delta}{Re_{\Delta}} V_{\Delta}, \quad (24)$$

где v_m – турбулентная составляющая эффективного коэффициента вязкости;

Δ – характерный масштаб ячейки расчетной сетки;

V_{Δ} – скорость в пределах данной ячейки;

$Re_{\Delta} = 2$ [14] – сеточное число Рейнольдса, определяющее переход в турбулентный режим течения жидкости.

ВЫВОД

Разработана математическая модель процесса плавления шихты в дуговой сталеплавильной печи, функционирующей на Белорусском металлургическом заводе. В математической модели распределение температур в шихте и «болоте» описывается трехмерным уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах с источниками теплоты. Учитывается использование газокислородных горелок и аргонной продувки жидкой фазы металла. Стационарное течение единой газожидкостной среды, возникающее при продувке металлической ванны, описывается системой нестационарных уравнений Навье–Стокса в приближении Буссинеска.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимошпольский В. И. Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. – Мн.: Навука і тэхніка, 1995.
2. Теплотехнология металлургических мини-заводов / В. И. Тимошпольский, Ю. В. Феоктистов, А. Б. Стеблов и др. – Мн.: Навука і тэхніка, 1992.
3. Исследование технологических процессов выплавки кордовой стали в сверхмощной дуговой печи / А. П. Фоменко, В. В. Эндерс, Д. С. Якшук и др. // Сталь. – 2000. – № 5. – С. 35–37.
4. Первые в СНГ системы донной продувки металла инертными газами в дуговой сталеплавильной печи / М. П. Гуляев, В. В. Филиппов, В. В. Эндерс и др. // Труды шестого конгресса сталеплавыльщиков. – М., 2001. – С. 308–313.
5. Использование альтернативной энергии при производстве стали в сверхмощной дуговой электропечи на Молдавском металлургическом заводе / Н. А. Богданов, И. В. Деревянченко, В. А. Гоменюк и др. // Труды шестого конгресса сталеплавыльщиков. – М., 2001. – С. 206–210.
6. Морозов А. В. Современное производство стали в дуговых печах. – Челябинск: Металлургия, 1987. – 175 с.
7. Экономия электроэнергии в дуговых сталеплавильных печах / Ю. Н. Тулуевский, И. Я. Зинуров, А. Н. Попов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 102 с.
8. Поволоцкий Д. Я., Гудим Ю. А., Зинуров И. Я. Устройство и работа сверхмощных дуговых сталеплавильных печей. – М.: Металлургия, 1990. – 176 с.
9. Промышленные теплотехнологии: Моделирование нелинейных процессов: Учеб. – Ч. 5 / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, А. П. Несенчук и др.; Под общ. ред. В. И. Тимошпольского, А. П. Несенчука. – Мн.: Выш. шк., 2000. – 319 с.
10. Игнатов И. И. Математические модели теплообмена в ДСП // Математическое моделирование и расчет дуговых и плазменных сталеплавильных печей: Сб. науч. тр. – ВНИИЭТО, 1983. – С. 17–19.
11. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах: Учеб. пособие / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, А. Б. Стеблов, И. А. Павлюченков; Под общ. ред. В. И. Тимошпольского. – Мн.: Выш. шк., 1992.
12. Мاستрюков Б. С. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей. – М.: Металлургия, 1986.

13. М а т е м а т и ч е с к о е моделирование трехмерной задачи движения алюминиевой и порошковой проволоки с учетом их плавления и усреднения при донной продувке металла аргоном / В. А. Вихлевщук, В. Ю. Болотов, И. А. Павлюченков и др. // Теория и практика металлургии. – 2000. – № 3. – С. 46–50.

14. Б е л о ц е р к о в с к и й О. М. Численное моделирование в механике сплошных сред. – М.: Наука, 1984. – 520 с.

15. А р с е н т ь е в П. П., Я к о в л е в Ю. Н., К о м а р о в С. В. Конвертерный процесс с комбинированным дутьем. – М.: Металлургия, 1991. – 176 с.

Представлена
НТС УНПО «БГПА–БМЗ»

Поступила 16.01.2002

УДК [677:628.84].004.182/183

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ТЕХНОЛОГИЮ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА В РАЙОНАХ С ЖАРКИМ И СУХИМ КЛИМАТОМ

Канд. техн. наук РЗАЕВ А. Р.

Азербайджанский технологический университет

Текстильное производство требует поддержания в зоне обработки волокнистых материалов оптимальных значений относительной влажности воздуха, что обеспечивает хорошую прочность волокон, отсутствие их ворсистости и слипаемости. Для большинства используемых волокон оптимальная влажность воздуха находится на уровне 60...80 %. Температура воздуха может колебаться от 20 до 30 °С и выбирается в этом диапазоне только с учетом обеспечения теплового комфорта обслуживающего персонала.

В текстильном производстве Республики Азербайджан простейшие системы кондиционирования воздуха (СКВ) начали применяться уже в начале XX в.

Основным режимом обработки приточного наружного воздуха был процесс его адиабатного увлажнения при использовании форсуночных камер или вращающихся распылителей [1, 2]. Начиная с 1960 г., в СКВ, применяемых в текстильной промышленности в жарком и сухом климате (в длительный летний период), для охлаждения и увлажнения воздуха традиционно в оросительных камерах используется холодная вода с температурой 6...8 °С, получаемая от парокомпрессорных холодильных машин. На работу таких СКВ затрачивается до 60 % всей электроэнергии, потребляемой ткацкими и прядильными цехами в указанных районах.

Для снижения расхода электроэнергии на функционирование СКВ автором предлагается использовать энергосберегающую теплотехнологию кондиционирования воздуха по схеме рис. 1 [2, 3]. В соответствии с рис. 1 в теплый период года наружный воздух G_n обрабатывается в центральном кондиционере 5 по прямоточной схеме, первоначально охлаждаясь в по-