

УДК 666.954.3.004.183

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ

Акад. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. ХРУСТАЛЕВ Б. М.,  
канд. техн. наук, доц. РОМАНИЮК В. Н.

*Белорусский национальный технический университет*

Снижение энергопотребления – одна из приоритетных задач крупнотоннажных производств. К числу последних следует отнести и производство асфальтобетонной смеси, в которой годовая потребность Республики Беларусь в 2006–2015 гг. оценивается величиной порядка 61 млн т. Для решения указанной задачи необходим постадийный анализ всего технологического цикла конкретного производства с точки зрения энергоиспользования. Производство асфальтобетонной смеси можно представить состоящим из четырех основных звеньев (рис. 1), в каждом из которых протекает соответствующий технологический передел.

Заключительная стадия производства асфальтобетонной смеси осуществляется в смесителе асфальтобетонного завода, где сходятся потоки всех ингредиентов для смешивания, после чего и получается конечный продукт. На рис. 2 приведена принципиальная схема смесителя асфальтобетонного завода с нанесением всех потоков, имеющих место при его работе, с помощью которой можно записать балансы энергии и эксергии протекающих в нем процессов.

Баланс энергии смесителя, приведенный к тонне асфальтобетонной смеси, имеет вид

$$g_{мп} h'_{мп} + g_{мз} h'_{мз} + g_{б} h'_{б} + g_{мп} k_{пт} h'_{в} + w'_{эл} = q''_{ос} + g_{мп} k_{пт} h''_{в} + h''_{абс}, \text{ МДж/т}, \quad (1)$$

где  $h'_{мп}$ , МДж/т – удельная массовая энтальпия входного потока минерального порошка;  $g_{мп}$ ,  $g_{мз}$ ,  $g_{б}$ , доли, – массовые доли компонентов асфальтобетонной смеси соответственно минерального порошка, минерального заполнителя, битума. Пересчет состава асфальтобетонной смеси, заданного на массу минеральных материалов, что принято в практике технологов,

в состав, определенный на общую массу, используемую в большинстве случаев, осуществляется следующим образом:

$$g_j = \frac{g_j^{\text{MM}}}{1 + \sum g_i^{\text{MM}}}, \quad (2)$$

где  $\sum g_i^{\text{MM}}$  – сумма массовых концентраций  $g_j^{\text{MM}}$  всех неминеральных компонентов асфальтобетонной смеси в составе, заданном на массу минеральных материалов асфальтобетонной смеси.

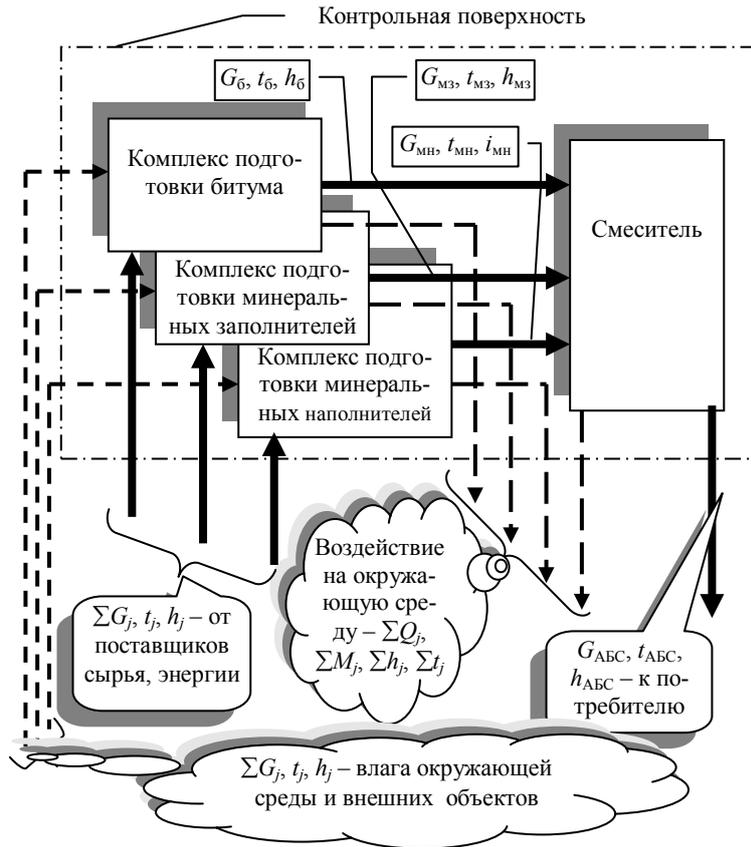


Рис. 1. Укрупненная структурная схема производства асфальтобетонной смеси:  $G_b, t_b, h_b$  – соответственно расход, температура, удельная энтальпия потока битума;  $G_{mz}, t_{mz}, h_{mz}$  – соответственно расход, температура, удельная энтальпия потока минеральных заполнителей;  $G_{mn}, t_{mn}, h_{mn}$  – то же минеральных наполнителей;  $G_j, t_j, h_j$  – то же  $j$ -го материального потока;  $G_{abc}, t_{abc}, h_{abc}$  – то же асфальтобетонной смеси;  $\sum M_j, \sum t_j, \sum h_j$  – соответственно все расходы, температуры, удельные энтальпии материальных потоков, поступающих или покидающих ту или иную подсистему;  $\sum Q_j$  – все тепловые потоки, покидающие или поступающие в дан-

ную подсистему

В (1) оставшиеся величины представляют:  $h'_b, h''_b$ , МДж/т, – соответственно удельные массовые энтальпии входного и выходного потоков воздуха влагосодержанием  $d_b$ , кг/кг, обеспечивающего подачу минерального порошка в смеситель с помощью системы пневмотранспорта;  $k_{пт}$  – удельный расход воздуха на тонну транспортируемого минерального порошка;

$h'_{мз}$ , МДж/т, – удельная массовая энтальпия потока минерального заполнителя (песчано-гравийная смесь);  $h'_б$ , МДж/т, – удельная массовая энтальпия потока битума;  $w'_{эл}$ , МДж/т, – удельный поток электроэнергии на тонну асфальтобетонной смеси, требуемой на обеспечение работы смесителя:

$$w'_{эл} = \frac{W_{эл}}{G'_{абс}}, \text{ МДж/т}, \quad (3)$$

где  $W_{эл}$ , МДж, – электроэнергия, подводимая к смесителю в течение времени протекания фазы смешения;  $G'_{абс}$ , т, – масса готовой асфальтобетонной смеси, получаемой за то же время протекания фазы смешения. Удельная массовая энтальпия выходного потока асфальтобетонной смеси рассчитывается следующим образом:

$$h''_{абс} = \sum g_j \bar{c}_{p,j} \Big|_0^{t''_{абс}}, \text{ МДж/т}, \quad (4)$$

где  $g_j$ , доли, – массовые доли компонентов асфальтобетонной смеси;  $\bar{c}_{p,j} \Big|_0^{t''_{абс}}$ , кДж/(кг·К), – теплоемкости компонентов асфальтобетонной смеси удельные массовые, изобарные, средние в интервале температур  $0-t''_{абс}$ . Здесь  $t''_{абс}$ , °С, – температура готовой асфальтобетонной смеси. Теплота процесса рассеяния энергии через ограждающие конструкции  $q''_{ос}$  может быть определена различными способами, например по заданному коэффициенту рассеяния  $\eta_{qптр}$  в долях полезного потока теплоты  $q_{см}$  процессов смешения компонентов асфальтобетонной смеси:

$$q''_{ос} = (1 - \eta_{qптр})q_{см}, \text{ МДж/т}. \quad (5)$$

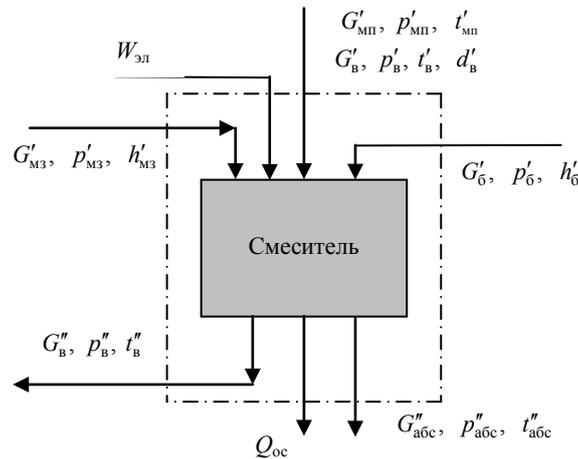


Рис. 2. Схема потоков смесителя асфальтобетонного завода

Поскольку доведение температуры смеси до требуемого значения происходит за счет энергии минеральных заполнителей непосредственно в смесителе при перемешивании компонентов и получении асфальтобетон-

ной смеси, теплота  $q_{см}$  процесса смешения в этом случае, может быть определена относительно теплоты процесса охлаждения минеральных заполнителей

$$h'_{мн} = 1 \text{ кДж/кг} = \sigma_{мн} (h'_{мз} - h''_{мз}), \text{ МДж/т.} \quad (6)$$

В графической форме баланс энергии смесителя приведен на рис. 3.

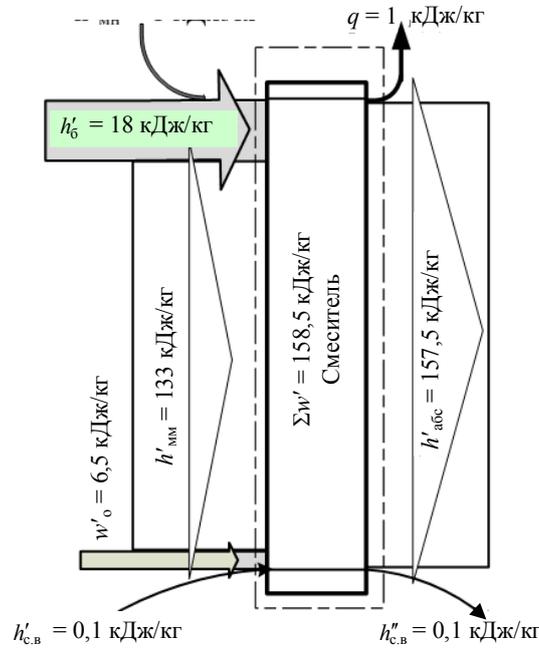


Рис. 3. Баланс энергии смесителя асфальтобетонного завода

Эксергетический баланс смесителя, приведенный к тонне асфальтобетонной смеси, может быть записан в виде

$$g_{мп} e'_{мп} + g_{мз} e'_{мз} + g_6 e'_6 + g_{мп} k_{пт} e'_в + w'_{эл} = d_e + d_i + e''_{абс}, \text{ МДж/т,} \quad (7)$$

где  $e'_{мп}$ ,  $e'_{мз}$ ,  $e'_6$ , кДж/т, – соответственно удельные массовые эксергии потоков минерального порошка, минерального заполнителя, битума, составляющих, в том числе, приходную часть баланса; прочие статьи приходной части баланса эксергии рассмотрены выше в пояснении баланса энергии.

Расходная часть баланса эксергии (7) включает в себя:  $d_i$ , МДж/т, – внутренние потери эксергии блока, определяемые балансовым методом [1];  $d_e$ , МДж/т, – внешние потери эксергии блока, которые в данном случае могут быть определены

$$d_e = e''_{q,oc} + g_{мп} k_{пт} e''_в, \text{ МДж/т,} \quad (8)$$

где  $e''_в$ , МДж/т, – удельная массовая эксергия выходного потока воздуха пневмотранспорта, обеспечивающего подачу минерального порошка в смеситель;  $e''_{q,oc}$ , МДж/т, – удельная эксергия потока теплоты процесса рассеяния энергии через ограждающие конструкции, отнесенная к единице мас-

сы асфальтобетонной смеси, определяемая в соответствии с соотношениями для эксергии потока теплоты [1]. При расчете величины  $e''_{q,oc}$  в качестве определяющей температуры следует принимать температуру асфальтобетонной смеси. В то же время при оценке воздействия на окружающую среду того же потока рассеяния энергии, определяющей температурой уже будет температура наружной поверхности смесителя. Наконец, в расходную часть баланса эксергии (7) входит  $e''_{abc}$ , кДж/т, – удельная массовая эксергия потока готовой асфальтобетонной смеси, которая характеризуется наличием всех составляющих эксергии потока вещества. В общем случае асфальтобетонная смесь состоит из потоков минерального заполнителя, минерального наполнителя и битума. Химическая составляющая эксергии минеральных заполнителей  $e_{\mu,мз} = 0$ , поскольку минеральный заполнитель в первую очередь  $SiO_2$ , химическая эксергия которого определена в [2] равной нулю. Из того же источника находится химическая составляющая эксергии минеральных наполнителей  $e_{\mu,мн} = 1045$  МДж/т, так как минеральный порошок чаще всего представлен доломитом  $CaCO_3$ . Химическая составляющая эксергии битума  $e_{\mu,б}$  не может быть рассчитана по методикам, предназначенным для чистых химических соединений. Главная трудность состоит в том, что точная молекулярная структура битума неизвестна. Картина усугубляется тем, что нефтеперегонные заводы СНГ производят битум не как целевой товар, полноправный, например со светлыми нефтепродуктами, а как остаточный продукт произвольного качества. В этом случае можно использовать методику, рекомендуемую для определения химической составляющей эксергии нефти [1]:

$$e_{\mu} = \kappa(1066 + 67,4\omega + 1875\nu + 3784\sigma + 177,8\xi), \text{ кДж/кг},$$

где  $\kappa = 7,817C$ ;  $\omega = 6H/C$ ;  $\nu = (3/7)(N/C)$ ;  $\sigma = 1 + 3(H - (O - S)/8)/C$ ;  $\xi = (3/8) S/C$ ;  $C + H + O + N = 1$  – массовые доли.

Состав битума осредненный [3]: С содержит от 70 до 85 %; Н – от 8 до 12 %; О – от 0,2 до 5 %; S – от 0,5 до 7 %; N – от 0,2 до 1 %.

Расчеты с учетом записанного состава дают величину химической составляющей эксергии потока битума  $e_{\mu} = 38\text{--}44$  МДж/кг. Учитывая все погрешности приведенной расчетной цепи, можно записать  $e_{\mu} = 41$  МДж/кг, что хорошо согласуется с  $e_{\mu}$  других нефтепродуктов [4]: неочищенный бензин  $e_{\mu} = 46$  МДж/кг; мазут  $e_{\mu} = 42$  МДж/кг. Учитывая шаг изменения  $e_{\mu}$ , при переходе к более тяжелой фракции нефтепродуктов следует считать приведенную здесь величину химической составляющей эксергии потока битума приемлемой.

Величина  $e''_{\kappa,abc}$ , МДж/т, – составляющей эксергии потока асфальтобетонной смеси, которую принято называть концентрационной, – определяется адгезионным взаимодействием вяжущего компонента асфальтобетонной смеси (битума) с минеральными материалами. Значение данной составляющей однозначно связано с качеством готовой асфальтобетонной смеси, в этой связи представляет интерес более подробный ее анализ. С этой целью целесообразно рассмотреть эксергетические превращения, протекающие в ходе процессов, осуществляемых в смесителе.

На рис. 4 эксергетические превращения представлены в виде полосовой диаграммы Грассмана. Очевидно, что потоками транзитной эксергии являются составляющие потоки  $E'_{т,пгс}$ ,  $E''_{тб}$ ,  $E''_{r,мп}$ ,  $E''_{r,б}$ . Частью полезного эффекта превращений являются: термическая составляющая эксергии потока МП  $E''_{r,мп}$  и главное – анализируемая составляющая эксергии потока асфальтобетонной смеси  $E''_{к,абс}$ , определение которой в требуемом аспекте, насколько известно, не решено. Ее решение позволяет получить оценку требуемого энергетического воздействия в смесителе на ингредиенты асфальтобетонной смеси, без которого не может быть обеспечено качество продукции. Физически это вытекает из следующего.

Для наступления адгезионного взаимодействия необходим контакт вяжущего битума со всеми частицами минеральных заполнителей и минерального порошка, в том числе и агрегатированными. Для обеспечения требуемого контакта необходимо в смесителе затратить энергию, минимальное значение которой и определяет  $E''_{к,абс}$ . Это следует из анализа диаграммы (рис. 4): работа механического перемешивания  $L'$  не должна быть меньше  $E''_{к,абс}$ , поскольку лишь в этом случае выполняется необходимое условие, вытекающее из баланса эксергии [1],  $\Sigma E' > \Sigma E''$ . Необходимое взаимодействие обеспечивается через затраты энергии на перемешивание ингредиентов, которые в идеальном варианте в свою очередь определяются энергией адгезионного взаимодействия.

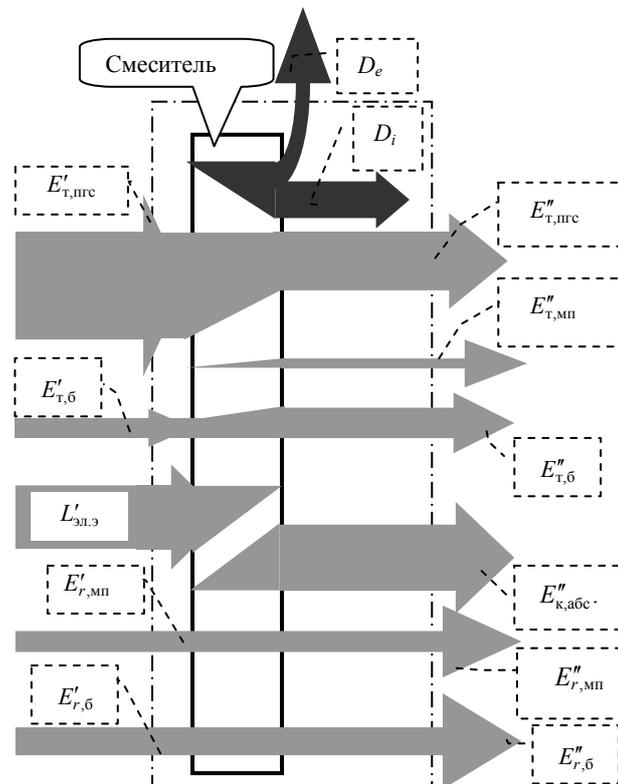


Рис. 4. Эксергетические превращения процесса образования асфальтобетонной смеси в смесителе

## ВЫВОД

Таким образом, из изложенного выше следует, что составляющая эксергии асфальтобетонной смеси  $E''_{к,абс}$  определяет энергетический минимум затрат идеального смесителя, затраты энергии на смешение в реальном смесителе могут быть только равными или большими. Кроме того, решение задачи расчета концентрационной составляющей эксергии потока асфальтобетонной смеси  $E''_{к,абс}$  имеет и технологическое звучание, поскольку, как и в случае с цементом [5, 6], открывает путь для получения количественной оценки качества асфальтобетонной смеси, что весьма важно для практики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Б р о д я н с к и й, В. М. Эксертетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 288 с.
2. С т е п а н о в, В. С. Химическая энергия и эксергия веществ / В. С. Степанов. – Новосибирск: Наука, 1985. – 100 с.
3. Л е о н о в и ч, И. И. Дорожно-строительные материалы: учеб. для вузов по специальности 1211 «Автомобильные дороги» / И. И. Леонович, К. Ф. Шумчик. – Минск: Вышэйш. шк., 1983. – 399 с.
4. Л е й т е с, И. Л. Теория и практика химической энерготехнологии / И. Л. Лейтес, М. Х. Сосна, В. П. Семенов. – М.: Химия, 1988. – 280 с.
5. Э к с е р г е т и ч е с к и й анализ при снижении энергозатрат в технологии цемента / М. А. Вердиян [и др.] // Цемент и его применение. – 1995. – № 5–6. – С. 35–44.
6. Р а с ч е т и формирование эксергии цемента в мельницах дискретно-непрерывного действия / М. А. Вердиян [и др.] // Цемент и его применение. – 2003. – № 9–10. – С. 41–43.

Представлена кафедрой  
теплогазоснабжения и вентиляции

Поступила 25.05.2009

УДК 669.04

## ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ФУТЕРОВКИ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Доктора техн. наук, профессора ТИМОШПОЛЬСКИЙ В. И., ТРУСОВА И. А.,  
НЕСЕНЧУК А. П., асп. МЕНДЕЛЕВ Д. В., канд. физ.-мат. наук GERMAN M. J.

*ПНИ «Евросталь ЛТД» (Украина),  
Белорусский национальный технический университет,  
РУП «Белорусский теплоэнергетический институт»*

В настоящее время при проектировании или модернизации нагревательных и термических печей машиностроительных предприятий приме-