

## ЭКСЕРГИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ

Канд. техн. наук, доц. РОМАНЮК В. Н.

*Белорусский национальный технический университет*

Крупнотоннажные производства, к числу которых относится и производство асфальтобетонной смеси (АБС), представляют наибольший интерес для анализа с целью определения их ресурсосберегающего потенциала. Выявление путей его реализации для конкретного производства наиболее просто осуществить с помощью эксергетического метода термодинамического анализа [1]. Для его проведения необходимо наличие методик расчета эксергии всех технологических потоков анализируемой системы, в данном случае производства АБС. Определению эксергии АБС посвящена данная работа.

Эксергия вещества в потоке для АБС включает все три составляющие, характерные для данного вида эксергии [1]:

$$e_{\text{АБС}}'' = e_{\text{рт, АБС}}'' + e_{\text{к, АБС}}'' + e_{\text{r, АБС}}'' \quad (1)$$

Определение входящих в (1) термомеханической  $e_{\text{рт, АБС}}''$  и реакционной  $e_{\text{r, АБС}}''$  составляющих эксергии потока АБС рассматривается в [2]:

$$e_{\text{рт, АБС}}'' = \sum g_j \bar{c}_{p, j} \Big|_{t_0}^{t_{\text{АБС}}''} ((t_{\text{АБС}}'' - t_0) - T_0 \ln T_{\text{АБС}}''/T_0), \text{ МДж/т},$$

где  $\bar{c}_{p, j} \Big|_{t_0}^{t_{\text{АБС}}''}$  – средние в интервале  $t_0 - t_{\text{АБС}}''$  изобарные удельные массовые теплоемкости компонентов;  $g_j$  – массовая доля компонента в АБС;  $t_0, T_0$  – температура окружающей среды;  $t_{\text{АБС}}'', T_{\text{АБС}}''$  – то же АБС;

$$e_{\text{r, АБС}}'' = \sum g_j e_{\mu, j}, \text{ МДж/т},$$

где  $e_{\mu, j}$  – химические составляющие эксергии компонентов АБС.

Там же [2] определена необходимость для АБС решения задачи расчета концентрационной составляющей эксергии вещества в потоке.

Концентрационная составляющая эксергии АБС связана с энергией адгезионного взаимодействия битумного вяжущего с минеральными материалами АБС и, следовательно, зависит от работы адгезионного взаимодействия битумного вяжущего  $w_{\text{ад}}$  и удельной поверхности минеральных материалов  $s_{\text{см}}$

$$e_{\text{к, АБС}}'' = s_{\text{см}} w_{\text{ад}}, \text{ кДж/кг}. \quad (2)$$

Работа адгезионного взаимодействия основных марок битумов БНД 60/90, БНД 90/130, БНД 130/200, БНД 200/300 на основных минеральных материалах (кварците, граните, плотном и слабом известняке, мраморе) определялась, например, в [3] с помощью известной формулы

$$w_{ад} = \sigma_{жг}(1 + \cos \theta),$$

где  $\sigma_{жг}$  – поверхностное натяжение битума;  $\theta$  – угол смачивания битума на данном материале.

Проведенные в [3] эксперименты в диапазоне температур 100...160 °С позволили рассчитать работу адгезии для перечисленных минеральных материалов и битумов (табл. 1). Прежде всего следует отметить, что приведенные данные охватывают широкую часть спектра сочетания материалов АБС, достаточную для практического применения решения поставленной задачи.

Таблица 1

Энергия адгезионного взаимодействия битумов и каменных материалов [3]

Марка битума	Кварцит		Гранит		Мрамор	
	Величина энергии адгезионного взаимодействия					
	эрг/см <sup>2</sup>	Дж/м <sup>2</sup>	эрг/см <sup>2</sup>	Дж/м <sup>2</sup>	эрг/см <sup>2</sup>	Дж/м <sup>2</sup>
Битум БНД 60/90 (П = 70 град)	63,67	0,06367	59,77	0,05977	65,9	0,0659
Битум БНД 90/130 (П = 105 град)	59,82	0,05982	55,48	0,05548	61,0	0,061
Битум БНД 130/200 (П = 185 град)	54,24	0,05424	50,55	0,05055	55,5	0,0555
Битум БНД 200/300 (П = 260 град)	53,0	0,053	53,0	0,053	54,0	0,054

Диапазон изменения энергии адгезионного взаимодействия битума с приведенными каменными материалами составляет  $(53...65,9) \cdot 10^{-3}$  Дж/м<sup>2</sup>. Амплитуда диапазона может быть оценена в 10 %, что на первом этапе позволяет усреднить работу адгезионного взаимодействия битума и минеральных материалов на уровне  $60 \cdot 10^{-3}$  Дж/м<sup>2</sup>. Возникающая погрешность в связи с таким усреднением на данном этапе вполне приемлема. Кроме того, ее дальнейшее уточнение в определенной мере теряет смысл, поскольку другой фактор, определяющий концентрационную составляющую эксергии АБС, устанавливается с ошибкой того же порядка, величина которой не может быть уменьшена. Этим фактором является удельная поверхность минеральных материалов, входящих в АБС. Значение удельной поверхности зерен минеральных материалов существенно влияет на свойства АБС, являясь при этом наименее изученной характеристикой. Минеральные материалы, входящие в АБС, в общем случае состоят из щебня, песка и минерального порошка. Размеры перечисленных компонентов отличаются друг от друга в сотни и тысячи раз. Например, для зерен кубической формы удельная поверхность, приходящаяся на тонну материала плотностью  $\rho = 2,65$  т/м<sup>3</sup>, увеличивается с  $15,8 \cdot 10^2$  до  $15,8 \cdot 10^7$  м<sup>2</sup>/т, т. е. возрастает в 100000 раз при изменении длины ребра куба соответственно от 10 мм до 0,1 мкм. Именно с таким разбросом размеров и приходится иметь дело при производстве АБС. Для порошковых фракций определение удельной поверхности разработано достаточно полно и основывается как на математических выкладках, так и на экспериментальных методах: воздухо- и водопроницаемости, адсорбции масла или красителей. Для грубозернистых материалов используются большей частью расчеты на базе геометрических характеристик зерен. При этом постулируется, что форма зе-

рен одинакова и может быть приравнена к классическим геометрическим формам различного рода. Для смеси фракций ситуация еще более усложняется. Следует отметить многообразие подходов к этой проблеме, например только в Западной Европе применяются французская, швейцарская, польская расчетные методики. Результаты описанных методик лежат в широком диапазоне, их погрешность может быть оценена в 50...100 % (табл. 2).

Таблица 2

Удельная поверхность минеральных материалов, входящих в АБС, определенная по различным методикам [4]

Размер фракций, мкм	Содержание фракции в смеси, %	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг			
		Франция	Польша	Швейцария	
				K = 3	K = 5
590...297	42,8	2,31	1,36	2,18	3,64
297...147	53,7	5,82	8,68	5,48	9,10
147...74	3,2	0,7	–	0,66	1,09
74...5	0,3	0,34	0,38	0,17	2,28
Итого	100,0	9,17	10,42	8,49	16,11

Естественно, что такой разброс результатов неприемлем, а это определяет необходимость применения экспериментальных методик для установления удельных поверхностей смеси. Понятно применение различных методов для мелкодисперсного и крупнодисперсного материала. В первом случае применяется продувка слоя воздухом, во втором – используется водопроницаемость слоя. Удельную поверхность минерального порошка определяют согласно ГОСТ 310–76, удельную поверхность частиц 140...5000 мкм – по методике испытания песков ГОСТ 8735–75, удельную поверхность щебня – по методике ВНИИНеруд. Удельная поверхность основных минеральных дорожно-строительных материалов различной крупности, полученной в результате дробления, приведена в табл. 3.

Из анализа данных таблицы вытекает, что удельная поверхность фракций, входящих в состав АБС, изменяется в 260 раз: от 1,3 м<sup>2</sup>/кг для щебня фракцией 25...15 мм, до 340 м<sup>2</sup>/кг для частиц, мельче 71 мкм. И хотя массовая доля минерального порошка в составе АБС находится в пределах 6 %, именно его поверхность является определяющей. Этот вывод весьма важен, и его следует учитывать в расчетах, анализе и, наконец, определении технологии смесеобразования АБС.

Таблица 3

Удельная поверхность наиболее распространенных дорожно-строительных минеральных материалов [4] для материала плотностью 2,65 т/м<sup>3</sup>

Размеры частиц, мм	Известняк, м <sup>2</sup> /кг	Гранит, м <sup>2</sup> /кг	Кварцевый песок, м <sup>2</sup> /кг	Диорит, м <sup>2</sup> /кг
Менее 0,071	340	290	190	286
0,071...0,14	70	67	40	87
0,14...0,315	25	28	12	22
0,315...0,63	13	14	8,0	10,5
0,63...1,25	6,0	6,5	5,8	5,5
1,25...3	3,5	3,7	2,5	3,6
3...5	1,6	1,7	1,0	1,45
5...10	0,71	0,74	–	0,71
10...15	0,4	0,44	–	0,42
15...25	–	0,28	–	0,30
25...40	–	0,17	–	–

Данные таблицы хорошо аппроксимируются выражением

$$s = aD^n,$$

поскольку в логарифмических координатах имеет место линейная зависимость удельной поверхности зерен от размера частиц (табл. 4).

Таблица 4

**Коэффициенты аппроксимирующей зависимости для расчета удельной поверхности различных фракций некоторых минеральных материалов**

Материал	Значение коэффициентов	
	<i>a</i>	<i>n</i>
Гранит	68	-1,04
Плотный известняк	70	-1,07
Кварцевый песок	42	-1,04

В табл. 5 приведено сопоставление расчетного способа определения удельной поверхности различных фракций минеральных материалов и экспериментального определения методами воздухо- и водопроницаемости. Анализ данных позволяет судить, что для гранита и известняка наиболее подходят расчетные зависимости для тетраэдрной формы зерен, для песка – кубической. Расчетный способ имеет ряд преимуществ, прежде всего, поскольку позволяет учитывать любой размер фракций и любую форму зерен, что и выделило его как основной способ определения поверхности минеральных материалов в АБС для нужд дорожной отрасли.

Таблица 5

Минеральный материал	Размер фракций, мм	Средний диаметр, $d_{cp}$ , мм	Удельная поверхность, $m^2/kg$			
			Расчетный способ			Измерения Воздухо- и водопроницаемость
			для шара $\frac{6}{dp}$	для куба $\frac{8,5}{dp}$	для тетраэдра $\frac{14,7}{dp}$	
Минеральный порошок	0,0005...0,001	0,00075	3000	4250	7360	–
	0,001...0,002	0,0015	1500	2120	3680	–
	0,002...0,004	0,003	750	1060	1840	<0,071
	0,004...0,008	0,006	378	535	925	300...500
	0,008...0,017	0,012	189,0	268	463	–
	0,017...0,035	0,026	86,0	122	210	–
	0,035...0,071	0,05	44,5	63	109	–
Песок	0,071...0,14	0,115	19,5	27,6	48	70
	0,14...0,315	0,23	9,8	14,0	24,1	25
	0,315...0,63	0,47	4,8	6,8	11,7	13
	0,63...1,25	0,94	2,41	3,4	5,9	6
	1,25...3,0	2,12	1,07	1,52	2,62	3,5
Щебень	3,0...5	4,0	0,57	0,80	1,39	1,6
	5,0...10	7,5	0,30	0,43	0,74	0,71
	10,0...15	12,5	0,18	0,26	0,44	0,43
	15,0...25	20,0	0,113	0,16	0,28	–
	25,0...40	32,5	0,07	0,10	0,17	–
	40,0...70	55,0	0,04	0,06	0,10	–

Плотность материала принята  $2,65 \text{ т/м}^3$

Удельная поверхность  $j$ -й фракции минеральной части АБС определяется

$$s_j = \frac{K_j}{d_{j,cp} \rho_j},$$

где  $K_j$ ,  $d_{j,cp}$ ,  $\rho_j$  – соответственно коэффициент формы, средний диаметр частиц и плотность материала  $j$ -й фракции.

Удельная поверхность материала АБС рассчитывается

$$s_{cm} = \sum_{j=1}^n \frac{s_j g_j}{100},$$

где  $g_j$ , % – содержание  $j$ -й фракции в смеси.

Коэффициент формы принимается для гравия и песка, имеющих округлую форму, но отличную от шара, равным  $K = 8$ ; для дробленого гравия –  $K = 10$ ; для щебня из гравия –  $K = 12$ ; для угловатых зерен, но не достигших формы тетраэдра (гранит, диорит, андезит, плотный известняк), –  $K = 14$ .

Расчеты удельной поверхности АБС типа А определили ее величину –  $29 \text{ м}^2/\text{кг}$ , для АБС типа Д –  $79,28 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Нетрудно видеть, что удельная поверхность минеральной части АБС возрастает от типа А до типа Д в 2,7 раза.

На основе приведенных данных по работе адгезионного взаимодействия битума и минеральных материалов, удельной поверхности последних, не представляет труда нахождение для АБС концентрационной составляющей эксергии вещества в потоке. Энергия адгезионного взаимодействия может быть принята, как ранее установлено, равной  $w_{ад} = 60 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}/\text{м}^2$ , удельная поверхность минеральных –  $s_{cm} = 29$  и  $79,3 \text{ м}^2/\text{кг}$  для типа А и типа Д АБС соответственно. Получаем  $e_{к,АБС} = 60 \cdot 10^{-3} \times 29 \cdot 10^3 = 1,74 \cdot 10^{-3} \text{ МДж}/\text{т}$  для типа А и  $4,76 \cdot 10^{-3} \text{ МДж}/\text{т}$  для типа Д.

Рассмотрим, согласно (1), определение эксергии потока АБС.

Температуру готовой АБС можно принять равной  $160 \text{ }^\circ\text{C}$ , температуру окружающей среды –  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Удельная массовая изобарная средняя в интервале температур  $20 \dots 160 \text{ }^\circ\text{C}$  теплоемкость АБС определяется соотношением

$$c_p \Big|_{20}^{160} = \sum_{j=1}^3 c_{p,j} \Big|_{20}^{160} g_j = 1,6 \cdot 0,06 + 0,84 \cdot 0,06 + 0,84 \cdot 0,88 = 0,886 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Величина удельной массовой термомеханической составляющей эксергии АБС равна

$$e_{рт,АБС} = 0,886 \cdot [(160 - 20) - (273 + 20) \ln(273 + 160)/293] = 22,6 \text{ МДж}/\text{т}.$$

Реакционная составляющая эксергии потока АБС определяется

$$e_{r,АБС} = \sum g_j e_{\mu,j}, \text{ МДж}/\text{т}.$$

В общем случае АБС состоит из потоков минерального заполнителя (МЗ), минерального наполнителя (МН) и битума (Б).  $e_{\mu, \text{МЗ}} = 0$ , поскольку МЗ состоит в первую очередь из  $\text{SiO}_2$ , химическая эксергия которого определена [5] равной нулю. Из того же источника находится  $e_{\mu, \text{МН}} = 1045 \text{ МДж/т}$ , так как МН, чаще всего, представлен доломитом  $\text{CaCO}_3$ . Реакционная составляющая битума определена ранее  $e_{\mu} = 41 \text{ МДж/кг}$ . Тогда, учитывая усредненный массовый состав АБС (рис. 1), можно рассчитать реакцию составляющую эксергии потока

$$e''_{r, \text{АБС}} = \sum g_j e_{\mu, j} = 0,06 \cdot 1045 + 0,06 \cdot 41 \cdot 10^3 = 2523 \text{ МДж/т.}$$

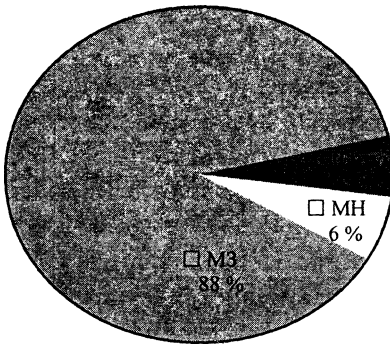


Рис. 1. Осредненный состав АБС

Концентрационная составляющая определяется на основании изложенных выше методик в соответствии с соотношением (2). Энергия адгезионного взаимодействия может быть принята, как ранее установлено, равной  $w_{\text{ад}} = 60 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/м}^2$ , удельная поверхность минеральных –  $s_{\text{см}} = 29$  и  $79,3 \text{ м}^2/\text{кг}$  для типа А и типа Д АБС соответственно. Получаем  $e_{\text{к, АБС}} = 60 \cdot 10^{-3} \cdot 29 \cdot 10^3 = 1,74 \cdot 10^{-3} \text{ МДж/т}$  для типа А и  $4,76 \cdot 10^{-3} \text{ МДж/т}$  для типа Д.

Таким образом получаем эксергию АБС

$$e_{\text{АБС}} = e_{\text{рт, АБС}} + e_{\text{к, АБС}} + e_{r, \text{АБС}} = 22,6 + 2523 + 4,17 \cdot 10^{-3} = 2545 \text{ МДж/т.}$$

Доминирует в величине эксергии АБС реакционная составляющая, являющаяся транзитной в цепочке технологических превращений с АБС на АБЗ. Вместе с тем, величина концентрационной составляющей эксергии АБС оказывается равной погрешности определения другой по значимости составляющей эксергии – термомеханической. Этот вывод позволяет принимать найденные в первом приближении с нулевым значением концентрационной составляющей эксергии АБС значения эксергетического КПД производства АБС как реальную величину. Вместе с тем, данная величина концентрационной составляющей эксергии АБС и изложенные в [2] представления о взаимосвязи ее величины с затратами энергии для проведения процесса смешения неплохо согласуются с эмпирическими данными. Минимальная энергия, требуемая для смесеобразования, оказывается равной

5 кДж/т, что согласуется с длительностью технологического процесса перемешивания, мощностью привода смесителя и его загрузкой.

Следующий аспект – это независимость величины концентрационной составляющей эксергии АБС от количества битума в смеси, если оно превышает некоторую пороговую величину. В АБС битум разделяется, и это не вызывает возражения у специалистов, занимающихся свойствами асфальтобетона, на два типа: структурированного, или пленочного, и свободного, или объемного. Пороговое минимальное количество битума в АБС определяется необходимым количеством структурированного битума, обеспечивающего обволакивание всей поверхности минеральных материалов пленкой битума. Между структурированным битумом, непосредственно связанным с минеральной подложкой, на которой он адсорбирован, и объемным битумом, занимающим межзерновое пространство АБС, находится переходная зона. В переходной, или диффузной, зоне битум имеет частично упорядоченное строение. Ее толщина колеблется от одного до нескольких микронов. В диффузной зоне происходит плавный переход к свойствам битума объемной зоны от свойств битума структурированной пленки. Непосредственно структурированный слой битума и по составу, и по толщине зависит от минеральной подложки, которая изменяет состав пленки битума. Наиболее активными компонентами битума по отношению к минеральному материалу являются асфальтены, содержащие активные функциональные группы, благодаря которым асфальтены накапливаются в структурированной зоне. В ней высокомолекулярные соединения битума упорядочены и образуют твердообразный слой, предельно насыщенный асфальтенами, граничащий с минеральной подложкой. Асфальтены ориентируются между собой по полярным группам в цепочки. Толщина пленки зависит от размера минеральных частиц и материала частиц и, чаще всего, не превышает одного микрона. Соотношение между количествами битума структурированного и объемного в АБС достаточно подробно рассматривается в ряде работ, из которых можно выделить [4]. Данные, приведенные в ней, позволяют рассчитать пороговое значение содержания битума в АБС, зависящее от ряда факторов. Прежде всего от состава и размера минеральных материалов, входящих в АБС. В смеси с оптимальной гранулометрией существует оптимальная технологическая толщина битумной пленки, при которой формируется материал с наибольшей прочностью и средней плотностью. Соотношение между ориентированным битумом и объемным битумом в АБС, соответствующее оптимальной технологической толщине битумной пленки и определенное в [4], приведено на рис. 2.

Из анализа следует, что в реальных АБС количество битума всегда превосходит пороговое значение, определяемое количеством структурированного битума, от которого зависит достоверность определения концентрационной составляющей эксергии. По этой причине далее вопрос о связи величины концентрационной составляющей с содержанием битума в АБС, в контексте поставленной задачи, следует считать решенным. Предложенная выше методика определения эксергии АБС с допустимой погрешностью дает возможность, прежде всего, оценить термодинамическую эф-

Содержание структурированного битума  
в общем количестве, %

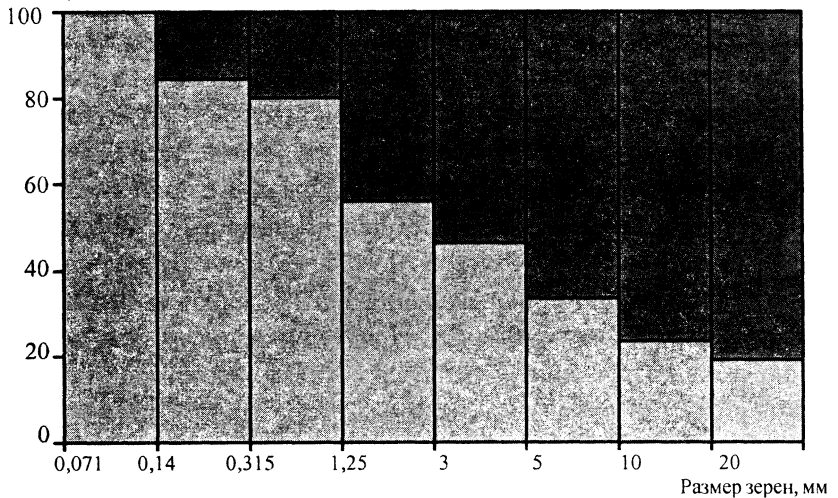


Рис. 2. Содержание ориентированного слоя битума в общей технологической пленке на минеральных зернах в асфальтовых системах с увеличением размера частиц: □ – структурированный битум; ■ – объемный битум

фективность теплотехнологического процесса производства асфальтобетонной смеси и определить пути ресурсосбережения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бродянский В. М., Фратшер В., Михалец К. Эксергетический метод и его приложения. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 288 с.
2. Романюк В. Н. Определение требуемого энергетического воздействия при образовании асфальтобетонной смеси // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1999. – № 6. – С. 63–66.
3. Агеева Е. Н. Исследование закономерностей структурообразования теплого асфальтобетона с целью оптимизации его технологии: Автореф. канд. техн. наук / ХАДИ. – Харьков, 1976.
4. Королев И. В. Пути экономии битума в дорожном строительстве. – М.: Транспорт, 1986. – 149 с.
5. Степанов В. С. Химическая энергия и эксергия веществ. – Новосибирск: Наука, 1985. – 100 с.

Представлена кафедрой  
промышленной теплоэнергетики  
и теплотехники

Поступила 28.03.2003