

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНОВ НА ОРГАНОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ВЯЖУЩИХ В ШИРОКИХ ДИАПАЗОНАХ ТЕМПЕРАТУР И СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

*Докт. техн. наук, проф. ВЕРЕНЬКО В. А., инж. МАКАРЕВИЧ А. А.*

*Белорусский национальный технический университет*

При конструировании и расчете дорожных одежд важно определить расчетные характеристики применяемых дорожно-строительных материалов. Эта задача не представляет трудностей, когда используются типовые строительные материалы, значения расчетных характеристик которых известны и могут быть приняты по соответствующим документам. Однако такой подход применим не всегда. Так, при использовании в качестве материала конструктивного слоя бетона на органогидрравлическом вяжущем (бетона на ОГВ), получаемого путем холодной регенерации асфальтобетона, определение его расчетных характеристик очень трудоемко, так как они зависят от множества факторов, к основным из которых можно отнести свойства исходного асфальтобетона, количество и вид добавок, режим производства работ. Проектирование состава такого материала, особенно в городских условиях, может представлять довольно серьезную проблему. Как показывает многолетний опыт диагностики материала дорожных покрытий улиц г. Минска, выполняемой Центром научных исследований и испытаний дорожно-строительных и гидроизоляционных материалов, изложенный в [1], и опыт зарубежных авторов [2], дорожное покрытие в городах является очень разнородным: на одной и той же улице может встречаться множество участков, отличающихся не только толщинами слоев и свойствами асфальтобето-

нов, но и имеющих полностью различные конструкции дорожной одежды. Проектирование состава материала и конструкции дорожной одежды на таких участках следует вести раздельно. Для этого необходимо изготовление и испытание до девяти составов смесей на каждом участке, что требует больших затрат времени и усилий. Согласно действующим нормам на проектирование дорожных одежд улиц населенных пунктов [3, 4] основными характеристиками материалов, необходимыми для расчета конструкции, являются модули упругости при различных температурах (от  $-15$  до  $50$  °С).

Многочисленные исследования [5–8] показывают, что существует прямая зависимость свойств дорожных композитных материалов от температуры и времени действия нагрузки. Большинство методик выражает эту зависимость через принципы температурно-временной аналогии [9], согласно которой экспериментальные кривые зависимости свойств материала от времени действия нагрузки (скорости деформации) для различных температур можно совместить путем переноса вдоль оси времени на величину сдвигки  $\alpha_T$ , которую рассчитывают из уравнения Вильямса – Ландела – Ферри [10]:

$$\lg \alpha_T = -\frac{c_1(T - T_q)}{c_2 + (T - T_q)}, \quad (1)$$

где  $T$  – текущая температура, К;  $T_q$  – температура стеклования, К;  $c_1$  – безразмерный коэффициент, обычно принимаемый равным 17,44;  $c_2$  – коэффициент, обычно принимаемый равным 51,6 К.

Однако этот принцип был разработан и применим только для реологически простых материалов, у которых  $\alpha_T$  зависит только от температуры, т. е. кривые зависимости свойств от времени действия нагрузки для различных температур параллельны друг другу. Композитные строительные материалы, к которым относятся асфальтобетоны и бетоны на ОГВ, не относятся к реологически простым, а следовательно напрямую принцип температурно-временной аналогии к ним не применим. В. А. Веренко была разработана усовершенствованная методика «температурно-структурной аналогии», учитывающая зависимость  $\alpha_T$  от времени действия нагрузки через количество упругих связей материала, вовлеченных в процесс деформирования  $n_y$  [11]. На практике применение этой методики затруднено в связи с необходимостью получения полной экспериментальной кривой свойств материала при одной температуре и трудностями в расчете  $n_y$ .

В данной работе на основе экспериментальных данных разработана методика прогнозирования расчетных характеристик композитных дорожных материалов в широком диапазоне изменения температур и скоростей деформации по результатам минимального числа испытаний, которая была реализована в программном комплексе, позволяющем применять ее на практике.

**Экспериментальные исследования свойств бетонов на ОГВ.** Для приготовления экспериментальных составов смесей бетонов на ОГВ был использован асфальтогранулят из покрытий улиц Я. Купалы и Ф. Скорины в г. Минске. Фрезерование на этих объектах производилось с использованием ресайклера Wirtgen 2200 CR, т. е. дробление и измельчение асфальтобетона проходило в тех же условиях, что и при регенерации покрытия этим ресайклером.

Асфальтогранулят был высушен до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 30 °С во избежание воздействия высокой температуры на битум.

Материал с улицы Я. Купалы был использован для приготовления первой серии (серия А) экспериментальных образцов. Его зерновой состав попадает в пределы гранулометрических кривых для горячих плотных щебеночных асфальтобетонов. Из гранулята с улицы Ф. Скорины изготавливались образцы серий Б и В. Так

как исходный материал был близок по своей гранулометрии к асфальтогрануляту серии А, для различий зернового состава для серии Б были использованы преимущественно крупные фракции, а серии В – мелкие. Кроме того, в серию В дополнительно было добавлено 25 % природного песка. Гранулометрические составы смесей каждой серии приведены в табл. 1, а кривые зерновых составов – на рис. 1.

Для сохранения постоянства зернового состава смесей каждой серии во всех образцах асфальтогранулят был рассеян на узкие фракции, которые добавлялись в требуемом количестве при изготовлении образцов.

Таблица 1

Зерновой состав асфальтогранулята

Серия	Полный просев, %, через сито с размером отверстий, мм										
	0,071	0,14	0,315	0,63	1,25	2,5	5	10	15	20	40
А	1,57	4,97	11,73	30,41	33,09	36,29	41,39	57,02	75,31	99,51	100
Б	0,25	0,34	0,44	0,49	0,57	0,6	0,91	31,83	59,75	77,62	100
В	1,37	4,46	15,1	30,68	50,72	67,38	78,46	87,51	95,04	99,82	100

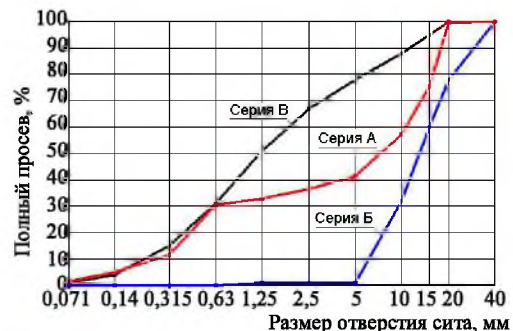


Рис. 1. Кривые зернового состава смесей трех серий

В качестве минерального вяжущего вещества был использован портландцемент марки М500, органического – медленнораспадающаяся катионная битумная эмульсия с содержанием битума 60 %. Медленнораспадающаяся битумная эмульсия была выбрана, так как ручная лабораторная мешалка, использованная для изготовления образцов, не дает надлежащего качества перемешивания быстрораспадающейся битумной эмульсии с асфальтогранулятом в связи с тем, что такая эмульсия распадается до окончания процесса перемешивания.

Изготовление образцов производилось при влажности смеси 6 %. При этом учитывалась вода, содержащаяся в битумной эмульсии, а количество дополнительно добавляемой воды рассчитывалось по формуле

$$B = W - 0,6Э, \quad (2)$$

где  $B$  – содержание воды, %;  $W$  – требуемая влажность смеси, %;  $Э$  – содержание эмульсии, %.

Для каждой серии были изготовлены по девять смесей с содержаниями вяжущих веществ и воды, представленными в табл. 2. Изготовление образцов производилось в лаборатории при температуре смеси 20 °С. Всего было изготовлено по 30 образцов с одинаковым содержанием вяжущего для каждой серии. Общее количество образцов бетонов на ОГВ составило 810 шт. Кроме того, чтобы оценить связь между свойствами бетонов на ОГВ и свойствами исходного асфальтобетона, было изготовлено 90 (по 30 для каждой серии) образцов горячим способом (из разогретого до температуры 160 °С исходного асфальтогранулята).

Таблица 2  
Составы экспериментальных смесей, %

№ смеси	Содержание сверх 100 %		
	Цемент, %	Эмульсия, %	Вода, %
0	Горячий способ формовки		
1	0	0	6
2	0	2	4,8
3	0	4	3,6
4	3	0	6
5	3	2	4,8
6	3	4	3,6
7	6	0	6
8	6	2	4,8
9	6	4	3,6

При изготовлении образцов из холодных смесей в мешалку добавлялось необходимое количество (в зависимости от серии) фракций сухого асфальтогранулята. Затем производилось перемешивание асфальтогранулята в течение 1 мин, при необходимости добавлялся цемент, и смесь перемешивалась еще минуту. Далее вводилось необходимое количество воды, смесь перемешивалась еще 1 мин. В последнюю очередь добавлялась битумная эмульсия и производилось окончательное перемешивание смеси.

Уплотнение образцов производилось на гидравлическом прессе в течение трех минут при давлении 20 МПа. Предварительное виброуплотнение не производилось.

Образцы из разогретого до температуры 160 °С асфальтогранулята изготавливались по стандартной методике [12].

Образцы бетонов на ОГВ испытывались в возрасте 28 сут. Определялся предел прочно-

сти на растяжение при расколе при температурах и скоростях деформации, приведенных в табл. 3. На каждое испытание использовалось по пять образцов.

Таблица 3

Параметры испытаний образцов

Номер испытания	1	2	3	4	5
Температура, °С	-15	-15	0	10	50
Скорость нагружения, мм/мин	10	3	3	3	3

Результаты испытаний представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты испытаний

Серия	Предел прочности на растяжение при расколе, для испытания № (по табл. 3), кН				
	1	2	3	4	5
А-0	28,70	33,05	14,89	7,69	0,74
А-1	14,15	18,83	8,06	4,97	0,27
А-2	15,02	19,92	7,54	4,1	0,22
А-3	15,51	20,77	6,83	3,25	0,14
А-4	14,88	15,63	9,9	6,26	0,81
А-5	15,55	17,52	9,44	5,68	0,74
А-6	16,08	18,28	9,03	5,07	0,66
А-7	18,81	18,39	12,98	7,01	1,87
А-8	19,54	19,44	12,52	6,37	1,59
А-9	20,51	20,55	12,26	5,65	1,40
Б-0	24,68	30,27	15,05	9,69	1,04
Б-1	7,21	9,07	4,92	3,52	0,15
Б-2	10,16	13,21	5,99	3,78	0,15
Б-3	13,06	17,14	7,72	4,9	0,15
Б-4	10,79	11,94	7,83	5,49	0,58
Б-5	11,85	13,22	8,27	5,6	0,55
Б-6	15,01	16,77	9,42	5,71	0,50
Б-7	13,98	14,49	10,71	7,29	1,36
Б-8	16,63	17,32	11,89	7,38	1,17
Б-9	19,06	19,93	12,95	7,54	0,86
В-0	17,94	20,05	13,13	9,50	0,68
В-1	4,11	4,62	1,63	0,58	0,15
В-2	6,86	7,03	4,52	2,28	0,16
В-3	8,96	8,55	5,94	2,80	0,17
В-4	6,00	6,12	3,85	2,01	0,88
В-5	6,89	6,61	4,96	2,42	0,92
В-6	7,52	7,04	6,10	3,65	0,95
В-7	8,60	8,86	5,15	2,21	1,82
В-8	9,37	8,92	6,95	3,48	1,95
В-9	11,76	11,08	9,45	5,38	2,11

**Определение максимальной структурной прочности и температуры стеклования экспериментальных составов.** Свойства бетонов на ОГВ, как и асфальтобетонов, зависят от температуры и скорости деформации. Максимальная прочность материала достигается при его

переходе в хрупкое состояние и называется предельной структурной прочностью  $R_c$ . Температура, соответствующая этому переходу при постоянной скорости деформации, является температурой стеклования  $T_q$ .

Для определения  $R_c$  и  $T_q$  исследуемых составов рассмотрим зависимость прочности материала от температуры при постоянной скорости деформации (3 мм/мин). Типичный график указанной зависимости приведен на рис. 2а. Однако для нахождения экстремума данной функции  $R_c$  удобно рассматривать ее десятичный логарифм, так как точки экстремума функции и ее логарифма совпадают. Как видно из рис. 2б, график логарифма функции левее точки 10 °С можно аппроксимировать параболой, построенной по значениям прочностей для трех температур -15; 0 и 10 °С.

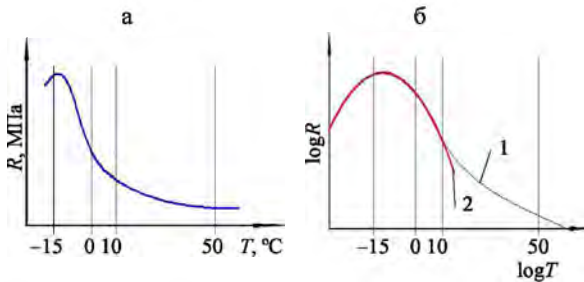


Рис. 2. Общий вид зависимости прочности асфальтобетонов и бетонов на ОГВ от температуры: а – в осях натуральных величин; б – в осях десятичных логарифмов; 1 – функция; 2 – аппроксимирующая функция

Таким образом, максимальное значение прочности можно найти через первую производную параболы, которой на рассматриваемом участке можно заменить график зависимости логарифма прочности от логарифма температуры. Саму параболу находим следующим образом:

1) запишем уравнения для трех точек, в которых значения прочности известны по результатам испытаний:

$$\lg R_{-15} = A(\lg T_{-15})^2 + B \lg T_{-15} + C; \quad (3)$$

$$\lg R_0 = A(\lg T_0)^2 + B \lg T_0 + C; \quad (4)$$

$$\lg R_{10} = A(\lg T_{10})^2 + B \lg T_{10} + C, \quad (5)$$

где  $\lg R_{-15}$ ,  $\lg R_0$ ,  $\lg R_{10}$  – десятичные логарифмы прочности материала, Па, при температуре -15; 0 и 10 °С соответственно;  $\lg T_{-15}$ ,  $\lg T_0$ ,  $\lg T_{10}$  – десятичные логарифмы значений температуры -15; 0 и 10 °С в К;

2) решая систему уравнений (3)–(5), находим значения коэффициентов параболы  $A$ ,  $B$  и  $C$ . Температуру стеклования (значение температуры в вершине параболы) определяем, приравняв первую производную уравнения параболы к нулю:

$$\lg T_q = \frac{-B}{2A}. \quad (6)$$

Соответствующее этой температуре значение прочности является предельной структурной прочностью

$$\lg R_c = A(\lg T_q)^2 + B \lg T_q + C. \quad (7)$$

Отечественными исследователями ранее была предложена формула для определения  $R_c$  по результатам испытаний прочности на раскол при одной температуре и двух различных скоростях деформирования [13]

$$R_c = \frac{\bar{R} \lg \frac{v_1}{v_2}}{\lg \frac{v_1}{v_2} - \lg \frac{R_1}{R_2}}, \quad (8)$$

где  $v_1, v_2$  – скорости деформирования при двух испытаниях, м/с,  $v_2 > v_1$ ;  $R_1, R_2$  – прочности материала, Па, при скоростях деформирования  $v_1$  и  $v_2$ , если  $R_1 > R_2$ , то численные значения прочностей следует заменить местами (т. е. числитель всегда должен быть меньше знаменателя);  $\bar{R}$  – средняя прочность  $\frac{R_1 + R_2}{2}$ .

Применительно к скоростям деформации  $v_1 = 3$  мм/мин и  $v_2 = 10$  мм/мин величина  $\lg \frac{v_1}{v_2}$  является постоянной. Тогда формула (8) может быть представлена в упрощенном виде

$$R_c = \frac{\bar{R}}{1 + 1,921 \lg \frac{R_1}{R_2}}. \quad (9)$$

Формула (9), приведенная в [14], прошла апробацию на практике и применяется для определения расчетных характеристик бетонов на ОГВ. Расчеты по ней дают хорошую сходимость результатов со значениями  $R_c$ , определенными в ходе настоящего исследования по (7).

Таким образом, предельную структурную прочность бетонов на ОГВ можно определить

по результатам только двух испытаний, было бы удобно по результатам этих же испытаний рассчитать и температуру стеклования. Однако такая формула отсутствует. Для ее получения проанализируем правую часть зависимости (8)

$$\frac{\lg \frac{v_1}{v_2}}{\lg \frac{v_1}{v_2} - \lg \frac{R_1}{R_2}} = \frac{1}{1 - \frac{\lg \frac{R_1}{R_2}}{\lg \frac{v_1}{v_2}}} = \frac{1}{1 - \operatorname{tg} \alpha}, \quad (10)$$

где  $\operatorname{tg} \alpha$  – тангенс угла наклона прямой, соединяющей точки  $(\lg v_1, \lg R_1; \lg v_2, \lg R_2)$ .

Тогда  $R_c = \frac{\bar{R}}{1 - \operatorname{tg} \alpha}$ , т. е. максимальная

структурная прочность зависит от  $\operatorname{tg} \alpha$ , математический смысл которого – значение первой производной функции прочности от скорости деформации в точке  $\bar{R}$ . Если результаты испытаний  $R_1$  и  $R_2$  равны, то  $\operatorname{tg} \alpha = 0$  и  $R_c = \bar{R} = R_1 = R_2$ , а температура испытания будет равна температуре стеклования. При положительном значении угла наклона ( $R_2 > R_1$ ) материал работает не в хрупкой стадии и его температура стеклования меньше температуры проведения испытания, при отрицательном угле наклона – температура стеклования выше температуры испытания. Таким образом, температура стеклования является функцией от температуры испытания, угла наклона  $\alpha$  и вида материала.

Статистическая обработка значений температуры стеклования экспериментальных составов, полученных по (6) с учетом прочности при температуре  $-15^\circ\text{C}$  и скоростях деформации 3 и 15 мм/мин позволила получить для расчетов температуры стеклования следующую формулу:

$$T_q = T \pm \left( 57,3 \operatorname{arctg} \left( -1,921 \lg \frac{R_1}{R_2} \right) \right)^m, \quad (11)$$

где  $T$  – температура, при которой производится испытание;  $m$  – коэффициент, зависящий от вида материала, для асфальтобетонов равный 1,35; для бетонов на ОГВ рассчитывается по формуле

$$m = 1,2 - (\text{Ц} \cdot 0,06)^2; \quad (12)$$

Ц – содержание цемента в составе бетона на ОГВ.

Знак «-» в формуле (11) применяется в случае, когда  $R_2 > R_1$ , если  $R_1 > R_2$ , то следует применять знак «+».

Результаты расчетов  $R_c$  и  $T_q$  для экспериментальных составов по формулам (9) и (11) – экспериментальные данные и (6) и (7) – теоретические данные представлены на рис. 3.

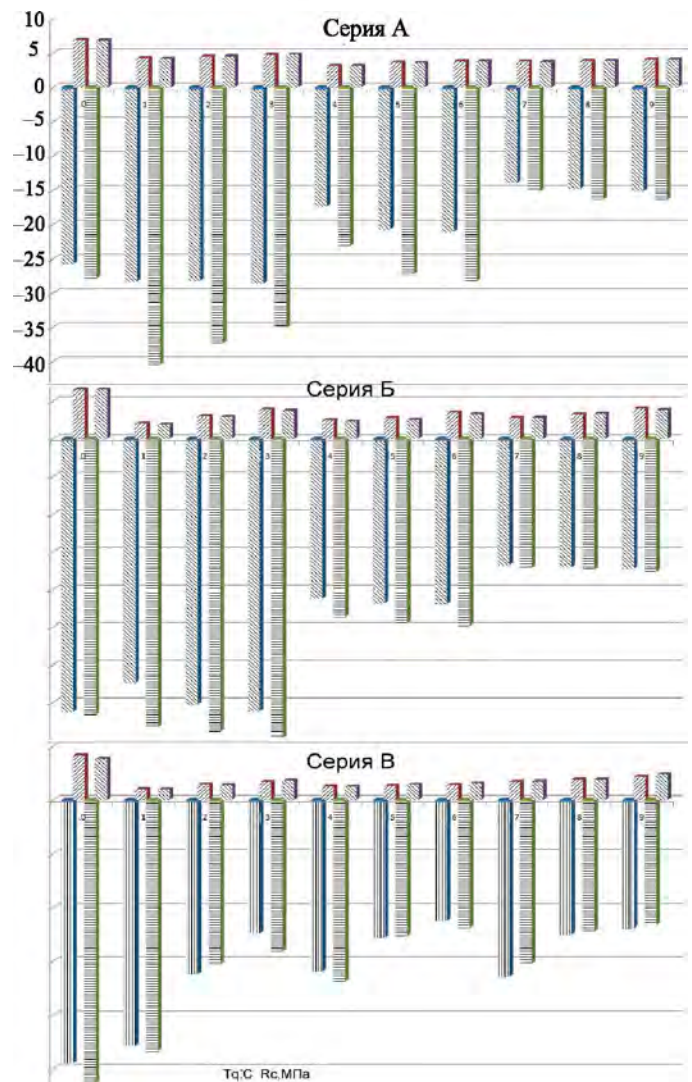


Рис. 3. Сопоставление данных по  $T_q$  и  $R_c$ :  $\blacksquare$   $\blacksquare$  – экспериментальные данные;  $\square$   $\square$  – теоретические

**Исследование зависимости прочности бетона на ОГВ от температуры.** Найдем функцию падения прочности материала  $R^3$  при скорости деформации 3 мм/мин с ростом температуры, отталкиваясь от полученных по (11) и (9) значений  $T_q$  и  $R_c$ . Для этого рассмотрим зависимость относительной разности логарифмов прочности  $\frac{\lg R_c - \lg R^3}{\lg R_c}$  от относительной разности температуры  $\Delta T = T_q - T$  (рис. 4).

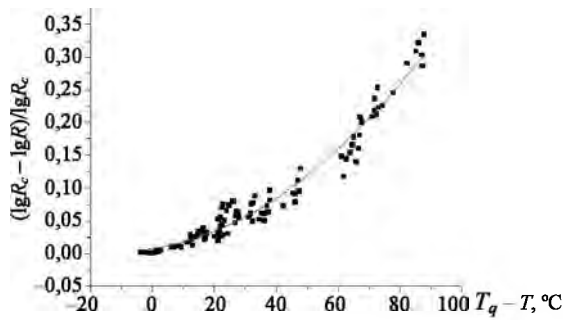


Рис. 4. Падение прочности (относительно  $R_c$ ) асфальтобетонов и бетонов на ОГВ с ростом температуры (относительно  $T_q$ )

Рассматриваемое распределение значений можно описать следующей квадратичной функцией:

$$\frac{\lg R_c - \lg R^3}{\lg R_c} = 0,00003\Delta T^2 + 0,00071\Delta T + 0,00775. \quad (13)$$

Коэффициент корреляции (13) составляет 0,97.

Из (13) можно находить значение прочности при скорости деформации 3 мм/мин при любой температуре, отталкиваясь от температуры стеклования и предельной структурной прочности, которые в свою очередь рассчитаны по результатам только двух испытаний (прочность на раскол при температуре  $-15^\circ\text{C}$  и скоростях деформирования 3 и 10 мм/мин):

$$\lg R^3 = \lg R_c \times (0,99225 - 0,00003\Delta T^2 - 0,00071\Delta T). \quad (14)$$

**Исследование зависимости прочности бетона на ОГВ от скорости деформирования.** Для исследования зависимости прочности материала от скорости деформирования производились испытания при скоростях деформации 3 и 10 мм/мин. По этим данным нельзя получить полное представление о виде функциональной зависимости. Можно рассчитать лишь угол наклона отрезка, соединяющего две известные точки (из (10)), зная который возможно прогнозировать изменение прочности материала в некотором диапазоне скоростей деформации отталкиваясь от прочности при базовой скорости, за которую следует принять 3 мм/мин. Скорость деформации 3 мм/мин принимается в качестве базовой, так как для этой скорости разработана зависимость прочности от температуры (13).

Рассмотрим зависимость тангенса угла наклона экспериментальной кривой от температуры стеклования  $T_q$  для температуры испытания, равной  $-15^\circ\text{C}$  (рис. 5).

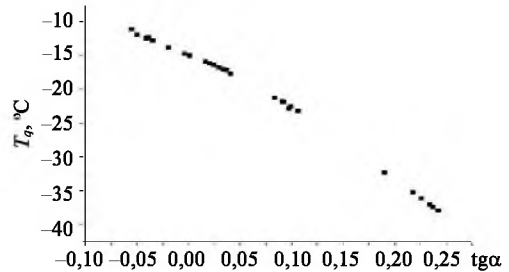


Рис. 5. Связь между температурой стеклования и углом  $\alpha$  при температуре испытания  $-15^\circ\text{C}$

Данную зависимость удобно аппроксимировать функцией, учитывающей температуру  $T$ , при которой необходимо найти значение прочности:

$$\text{tg}\alpha = -\frac{T_q - T}{(100 + 2T)m}. \quad (15)$$

Коэффициент корреляции (15) составляет 0,98.

Совмещая (14) и (15), получаем зависимость для нахождения прочности материала при скорости деформации  $v$  и температуре  $T$

$$R_{vT} = 10^{\lg R_c^3 + \text{tg}\alpha(\lg v - \lg v^3)}, \text{ Па}, \quad (16)$$

где  $\lg v$  – десятичный логарифм скорости деформации  $v$ , м/с, при которой необходимо найти значение прочности;  $\lg v^3$  – логарифм скорости деформации,  $v = 3$  мм/мин, м/с.

**Автоматизация прогнозирования расчетных характеристик.** Так как расчеты по (8)–(16) довольно трудоемки и требуют некоторых логических операций (таких как выбор большего значения из двух испытаний прочности), для более удобного применения полученной методики на практике разработана компьютерная программа (рис. 6), позволяющая получить расчетные характеристики материалов (асфальтобетонов и бетонов на ОГВ), задаваясь лишь результатами испытаний двух величин: пределов прочности на раскол при температуре  $-15^\circ\text{C}$  и скоростях деформации 3 и 10 мм/мин.

Дополнительной функцией программы является возможность более точного прогнозирования свойств материалов при условии одного дополнительного испытания (в качестве такого испытания рекомендуется использовать предел

прочности на раскол при температуре 50 °С и скорости деформации 3 мм/мин). В этом случае в (14) и (16) вводятся коэффициенты приведения, учитывающие свойства материала, полученные по дополнительному испытанию, что позволяет добиться еще более точного результата.

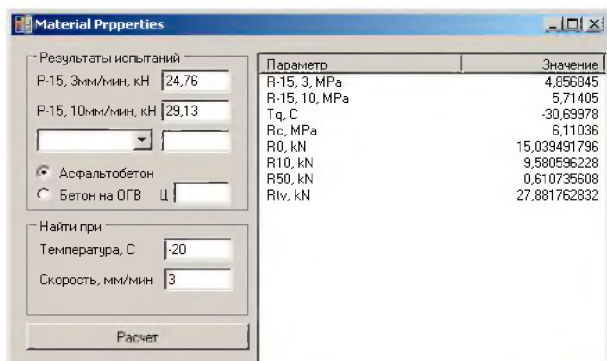


Рис. 6. Общий вид разработанной программы для определения расчетных характеристик бетонов на ОГВ

Результаты расчета прочности экспериментальных составов при различных температурах по разработанной методике приведены в табл. 5.

Таблица 5

**Результаты теоретических расчетов прочности образцов**

Серия	Теоретически рассчитанный предел прочности на растяжение при расколе, для испытания № (по табл. 3), кН				
	1	2	3	4	5
А-0	28,7	33,05	18,07	11,78	0,82
А-1	14,15	18,83	7,92	4,79	0,25
А-2	15,02	19,92	8,43	5,11	0,27
А-3	15,51	20,77	8,57	5,14	0,26
А-4	14,88	15,63	11,04	8,09	0,94
А-5	15,55	17,52	10,77	7,53	0,72
А-6	16,08	18,28	11,03	7,65	0,71
А-7	18,81	18,39	14,64	11,06	1,44
А-8	19,54	19,44	15,03	11,25	1,41
А-9	20,51	20,55	15,69	11,7	1,44
Б-0	24,68	30,27	13,77	8,28	0,41
Б-1	7,21	9,07	4,45	2,9	0,22
Б-2	10,16	13,21	5,94	3,71	0,23
Б-3	13,06	17,14	7,45	4,59	0,26
Б-4	10,79	11,94	7,68	5,48	0,59
Б-5	11,85	13,22	8,35	5,91	0,61
Б-6	15,01	16,77	10,5	7,39	0,73
Б-7	13,98	14,49	10,54	7,81	0,96
Б-8	16,63	17,32	12,4	9,14	1,08
Б-9	19,06	19,93	14,7	10,37	1,19
В-0	17,94	20,05	12,06	8,25	0,72

Окончание табл. 5

Серия	Теоретически рассчитанный предел прочности на растяжение при расколе, для испытания № (по табл. 3), кН				
	1	2	3	4	5
В-1	4,11	4,62	2,93	2,11	0,24
В-2	6,86	7,03	5,27	3,98	0,55
В-3	8,96	8,55	7,2	5,59	0,85
В-4	6,00	6,12	4,63	3,52	0,50
В-5	6,89	6,61	5,53	4,30	0,67
В-6	7,52	7,04	6,16	4,84	0,79
В-7	8,60	8,86	6,56	4,91	0,65
В-8	9,37	8,92	7,52	5,82	0,88
В-9	11,76	11,08	9,48	7,35	1,10

**ВЫВОДЫ**

1. Сравнивая полученные значения с результатами испытаний (табл. 4), можно заметить, что значительные отличия наблюдаются лишь для образцов бетонов на ОГВ серии А без цемента. Для этих же образцов сильно отличаются теоретические и экспериментальные значения температуры стеклования (рис. 3).

2. Значения расчетных характеристик, вычисленные по разработанной методике, хорошо коррелируются с результатами экспериментальных испытаний. Для дополнительной апробации методики производилась ее проверка по базе свойств асфальтобетонов, наработанной в ходе диагностики материалов дорожных покрытий.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. **Афанасенко, А. А.** Опыт применения диагностики материала дорожного покрытия на примере дорог и улиц города Минска / А. А. Афанасенко, А. А. Макаревич // Проблемы надежности дорожных одежд городских улиц и дорог: сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. – Минск: БНТУ, 2005. – С. 16–28.
2. **Kukielka, J.** Cold recycling of bituminous pavement with cement additive in quantity of  $\geq 5\%$  / J. Kukielka // Seminar on road pavement recycling. October 10th–11th. Warsaw, 2002.
3. **Технический кодекс** установившейся практики 110–2007. Восстановление дорожных одежд улиц населенных пунктов способами холодной регенерации на месте. – Минск: Мин-во жилищно-коммунального хозяйства Респ. Беларусь, 2008. – 29 с.
4. **Технический кодекс** установившейся практики 45-3.03-3–2004. Проектирование дорожных одежд улиц и дорог населенных пунктов – Минск: Мин-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2005 – 54 с.

5. **Chapuis, R. P.** Temperature dependent tensile strength of asphalt mixtures in relation to field cracking data / R. P. Chapuis, A. Gatién // Engineering properties of asphalt mixtures and the relationship to their performance / G. A. Huber, D. S. Decker. – Philadelphia, PA: ASTM, 1995. – P. 180–193.

6. **Kim, R. Y.** Modeling of Asphalt Concrete / R. Y. Kim. – McGraw-Hill Professional, 2008. – 460 p.

7. Low Temperature Cracking of Asphalt Concrete Pavements / M. O. Marasteanu [et al]. – Minnesota Department of Transportation, 2004. – 228 p.

8. **Печеньный, Б. Г.** Принцип температурно-временной суперпозиции в исследованиях асфальтобетонов / Б. Г. Печеньный, Е. П. Железко, Л. С. Губач // Труды БашНИИ НП. – 1975. – Вып. XV. – С. 67–74.

9. **Ферри, Дж.** Вязкоупругие свойства полимеров / Дж. Ферри. – М.: Иностранная лит-ра, 1963. – 535 с.

10. **Вильямс, М.** Температурная зависимость релаксационных процессов в аморфных полимерах и других стеклюющихся жидкостях / М. Вильямс, Р. Ландел,

Дж. Ферри // Проблемы современной физики. Физика полимеров. – 1956. – Т. 8, № 12. – С. 20–33.

11. **Веренько, В. А.** Дорожные бетоны на органогидрравлических вяжущих. Теория и практическое применение: дис. ... д-ра техн. наук / В. А. Веренько. – Минск, 1998. – 389 с.

12. **Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон.** Методы испытаний: СТБ 1115–2004. – Минск: Мин-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2004. – 36 с.

13. **Веренько, В. А.** Дорожные композитные материалы. Структура и механические свойства / под ред. И. И. Леонovichа. – Минск: Навука і тэхніка, 1993. – 246 с.

14. **Бетоны на органогидрравлических вяжущих.** Технические условия: СТБ 1415–2003. – Минск: Мин-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2004. – 19 с.

Поступила 19.10.2009