

Прогнозирование структурных характеристик дорожного бетона

**Саканов Дархан Куандыкович , канд. техн. наук,
Бабицкий Вячеслав Вацлавович , д-р техн. наук, профессор
Бусел Алексей Владимирович , д-р техн. наук, профессор**

* Базовое уравнение для расчета времени (глубины) пропитки бетона

Время пропитки

$$\tau_{\min} = \frac{2,5 \cdot \eta \cdot (1 - \Pi)^2 \cdot S}{\Pi^2 \cdot P_k}$$

где $\tau_{\min}$	– минимальное время прохождения жидкости через пропитываемый слой;
η	– вязкость жидкости;
Π	– пористость слоя;
S	– удельная поверхность сухой асбестоцементной смеси;
P_k	– перепад давлений (капиллярное давление), обеспечивающий пропитку.

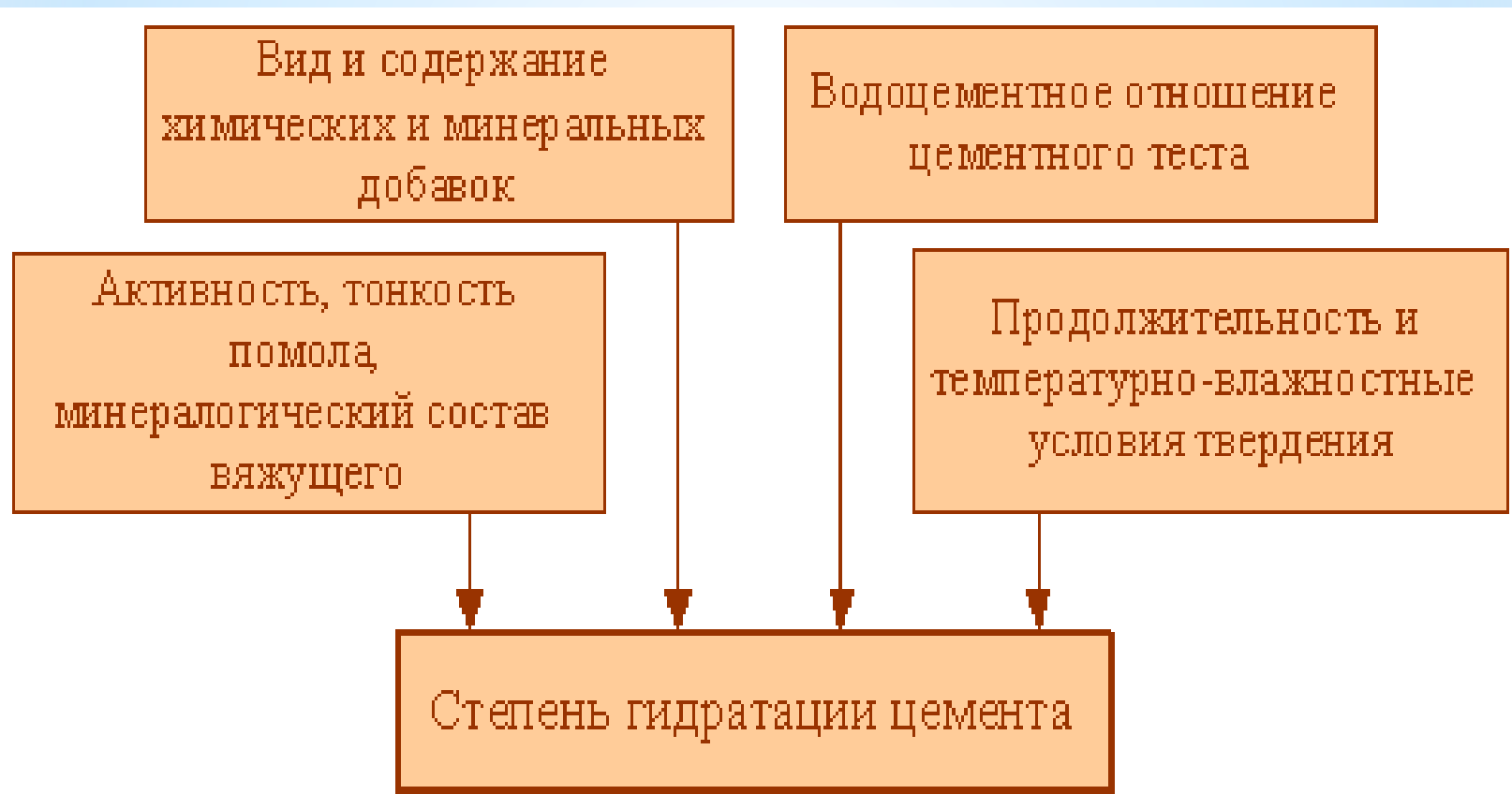
$$\tau = \frac{k_T \cdot \eta \cdot (1 - \Pi_k)^2 \cdot S_{\text{ц}} \cdot \delta}{\Pi_k^2 \cdot P_k}$$

Толщина слоя

$$\delta = \frac{k_T \cdot \tau \cdot \Pi_k^2 \cdot P_k}{\eta \cdot (1 - \Pi_k)^2 \cdot S_{\text{ц}}}$$

где τ	– время прохождения жидкости через пропитываемый слой, с;
δ	– толщина пропитываемого слоя, мм
k_T	– коэффициент, учитывающий технологические факторы
η	– вязкость жидкости, сП;
Π	– капиллярная пористость слоя, д. ед.;
$S_{\text{ц}}$	– удельная площадь поверхности цемента, м ² /кг;
P_k	– перепад давлений (капиллярное давление), обеспечивающий пропитку, Па.

* Алгоритм расчета степени гидратации цемента



* Степень гидратации цемента, %

$$\alpha_{28}^t = \zeta_t \cdot \zeta_{du} \cdot k_{S28} \cdot k_{SO_3 28} \cdot \left[60 \cdot X - \sqrt[3]{(1,65 \cdot X)^2 \cdot e^{1,65X}} \right] \quad \text{при } X < 1,65$$

$$\alpha_{28}^t = \zeta_t \cdot \zeta_{du} \cdot k_{S28} \cdot k_{SO_3 28} \cdot [70 + 5 \cdot (X - 1,65)] \quad \text{при } X \geq 1,65$$

где ζ_t – коэффициент, учитывающий влияние температуры твердения;

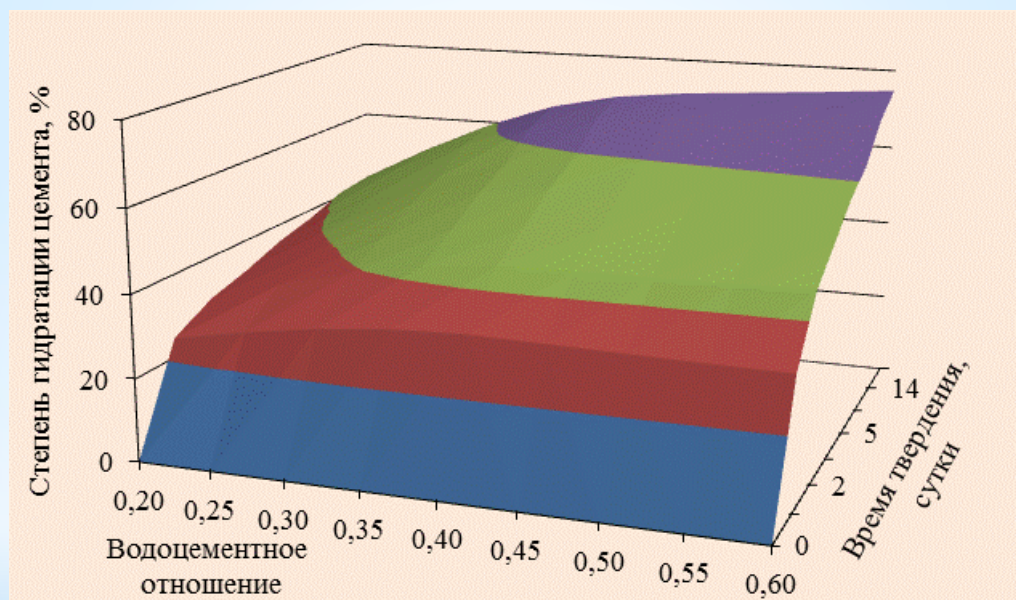
ζ_{du} – коэффициент, учитывающий влияние добавки ускорителя на процесс твердения;

k_{S28} – коэффициент, учитывающий влияние тонкости помола цемента;

$k_{SO_3 28}$ – коэффициент, учитывающий влияние содержания гипса в цементе.

$\alpha_t = \alpha_{отн} \cdot \alpha_{28}^t$ абсолютная величина степени гидратации цемента в возрасте, отличном от проектного

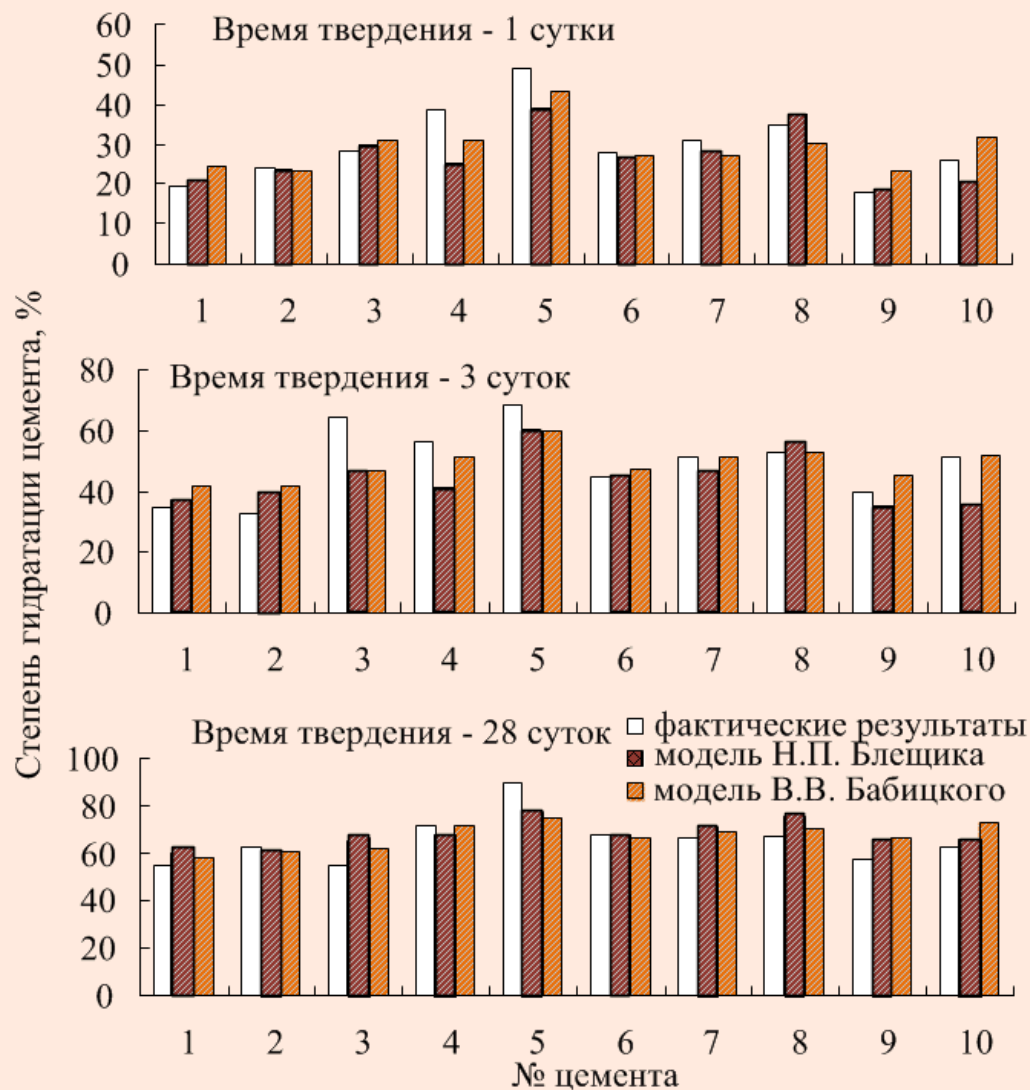
* Зависимость степени гидратации цемента от водоцементного отношения цементного теста



* Характеристики цементов

№ цемен та	Минералогический состав, %				SO ₃ , %
	C ₃ A	C ₄ AF	C ₃ S	C ₂ S	
1	7,1	10,3	58,2	21,1	0,36
2	12,5	9,4	38,5	35,0	0,52
3	8,8	10,2	53,7	22,8	2,27
4	8,0	15,0	61,0	15,0	2,70
5	8,0	15,0	61,0	15,0	2,70
6	12,0	14,0	49,0	21,0	1,50
7	14,0	5,0	66,0	9,0	0,00
8	14,0	5,0	66,0	9,0	2,70
9	2,0	16,0	66,0	9,0	0,00
10	2,0	16,0	66,0	9,0	2,70

* Степень гидратации цементов с различным минералогическим составом



* Гелевая, капиллярная и общая объемная пористость цементного камня, доли ед.

$$\Pi_{\Gamma} = 0,59 \cdot \frac{\mathcal{C}}{\rho_{\mathcal{C}}} \cdot \alpha$$

Гелевая

$$\Pi_{\mathcal{K}} = \mathcal{C} \cdot \left[\frac{\left(\frac{\mathcal{B}}{\mathcal{C}} \right)_{\mathcal{B}}}{\rho_{\mathcal{B}}} - \frac{1,1 \cdot \alpha}{\rho_{\mathcal{C}}} \right]$$

Капиллярная

$$\Pi_{\mathcal{O}} = \mathcal{C} \cdot \left[\frac{\left(\frac{\mathcal{B}}{\mathcal{C}} \right)_{\mathcal{B}}}{\rho_{\mathcal{B}}} - \frac{0,51 \cdot \alpha}{\rho_{\mathcal{C}}} \right]$$

Общая

* Гелевая, капиллярная и общая пористость бетона

$$\Pi_{\Gamma}^{\delta} = \frac{0,195 \cdot \alpha \cdot \text{Ц}}{1000}$$

Гелевая

$$\Pi_{\text{К}}^{\delta} = \frac{\text{Ц} \cdot \left[0,98 \cdot \left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}} \right)_{\delta} - 0,0094 - 0,369 \cdot \alpha \right]}{1000}$$

Капиллярная

$$\Pi_{\text{О}}^{\delta} = \frac{\text{Ц} \cdot \left[0,98 \cdot \left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}} \right)_{\delta} - 0,0094 - 0,369 \cdot \alpha \right]}{1000}$$

Общая

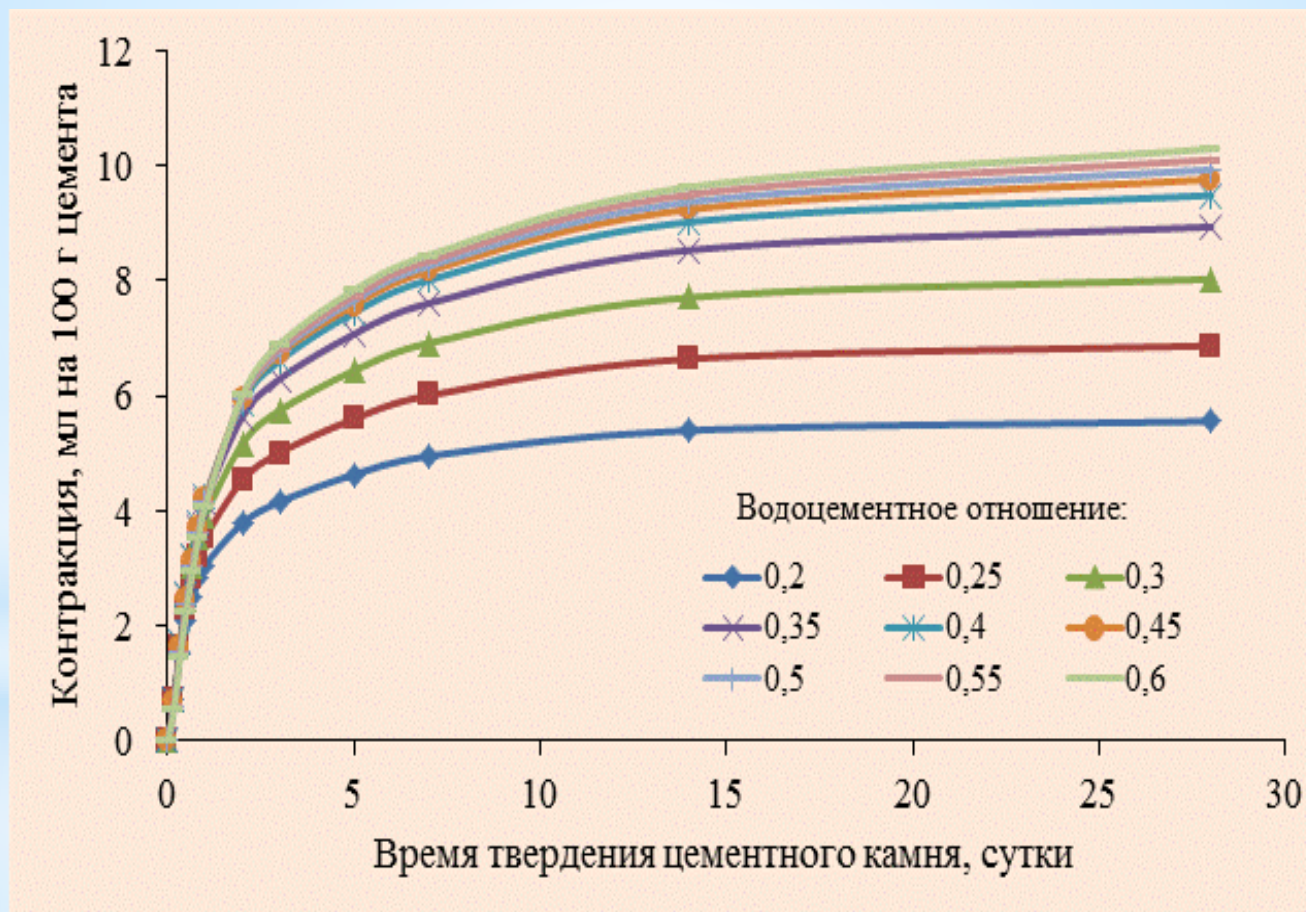
* Контракция цемента

$$K = V_{\tau} - Ц \cdot \left(\frac{1 - \alpha}{\rho_{ц}} + \frac{\frac{В}{Ц} - 0,23 \cdot \alpha}{\rho_{в}} + \frac{\alpha}{\rho_{пр}} \right) \quad \text{м}^3/\text{м}^3 \text{ бетона}$$

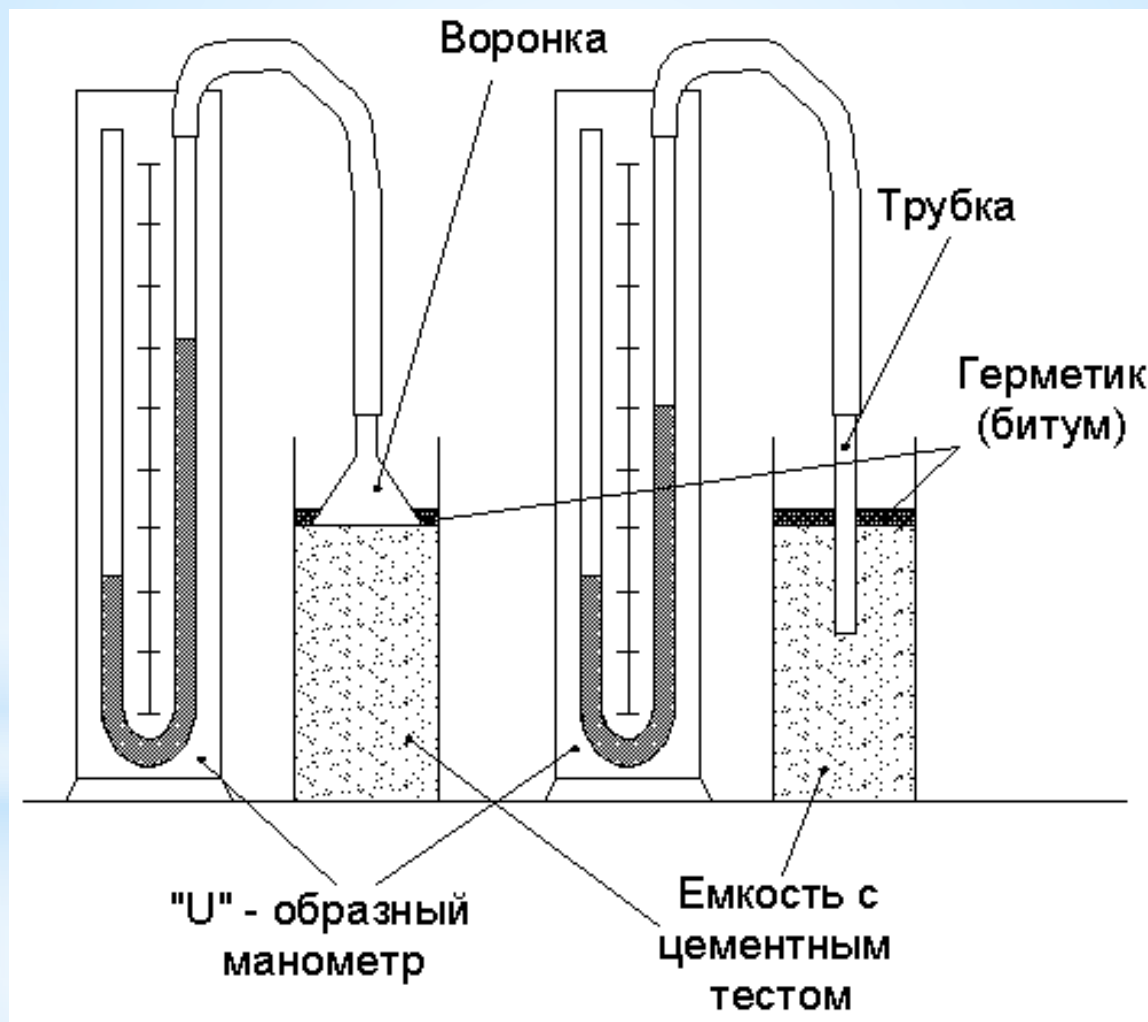
$$K = V_{\tau} - Ц \cdot \left(\frac{1 - \alpha}{\rho_{ц}} + \frac{\frac{В}{Ц} - 0,23 \cdot \alpha}{\rho_{в}} + \frac{\alpha}{\rho_{пр}} \right) \cdot \frac{1 \cdot 10^5}{Ц} \quad \text{л}/\text{м}^3 \text{ бетона}$$

$$K = V_{\tau} - Ц \cdot \left(\frac{1 - \alpha}{\rho_{ц}} + \frac{\frac{В}{Ц} - 0,23 \cdot \alpha}{\rho_{в}} + \frac{\alpha}{\rho_{пр}} \right) \quad \text{мл}/100 \text{ г цемента}$$

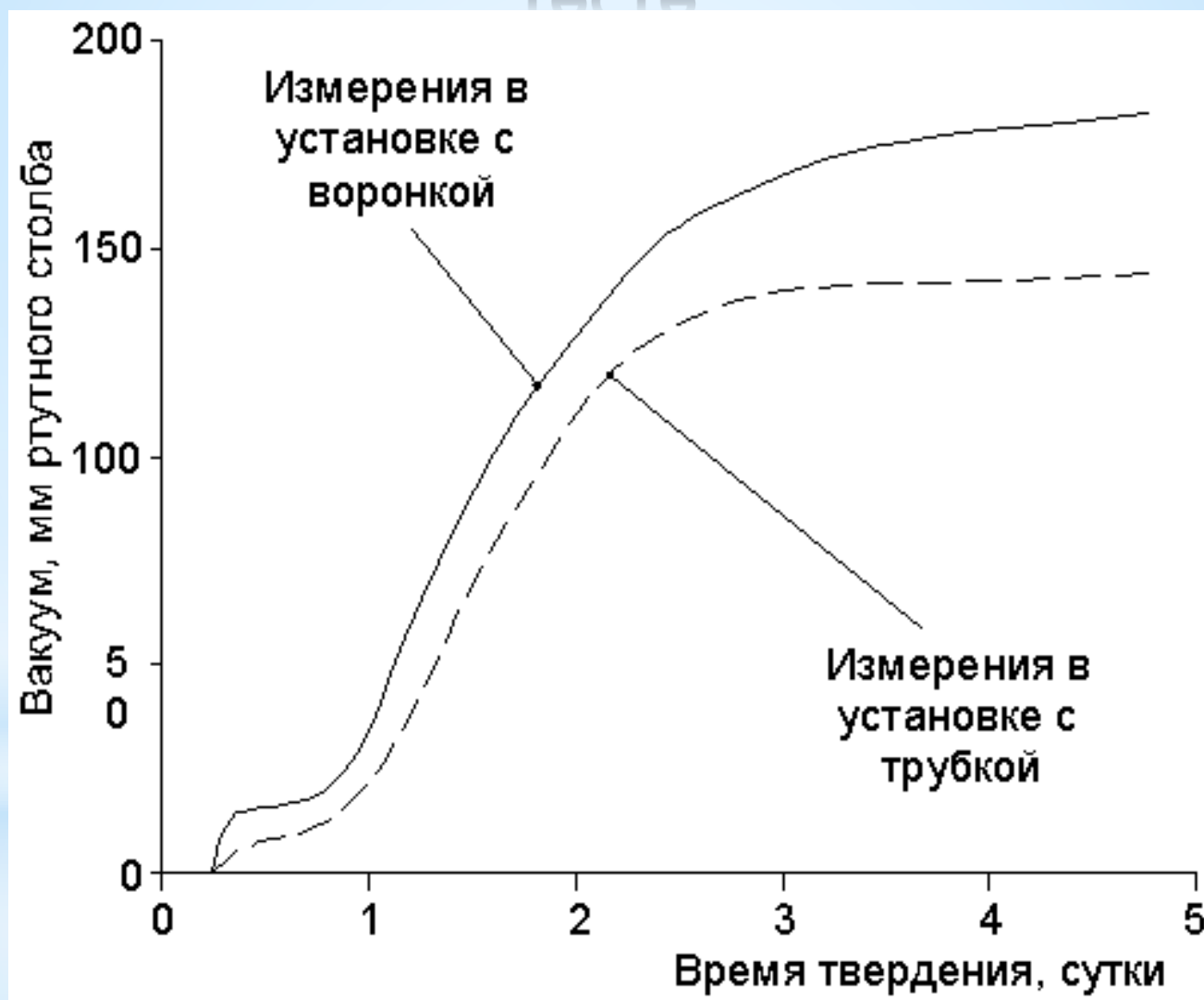
* Зависимость контракции цемента от водоцементного отношения цементного теста



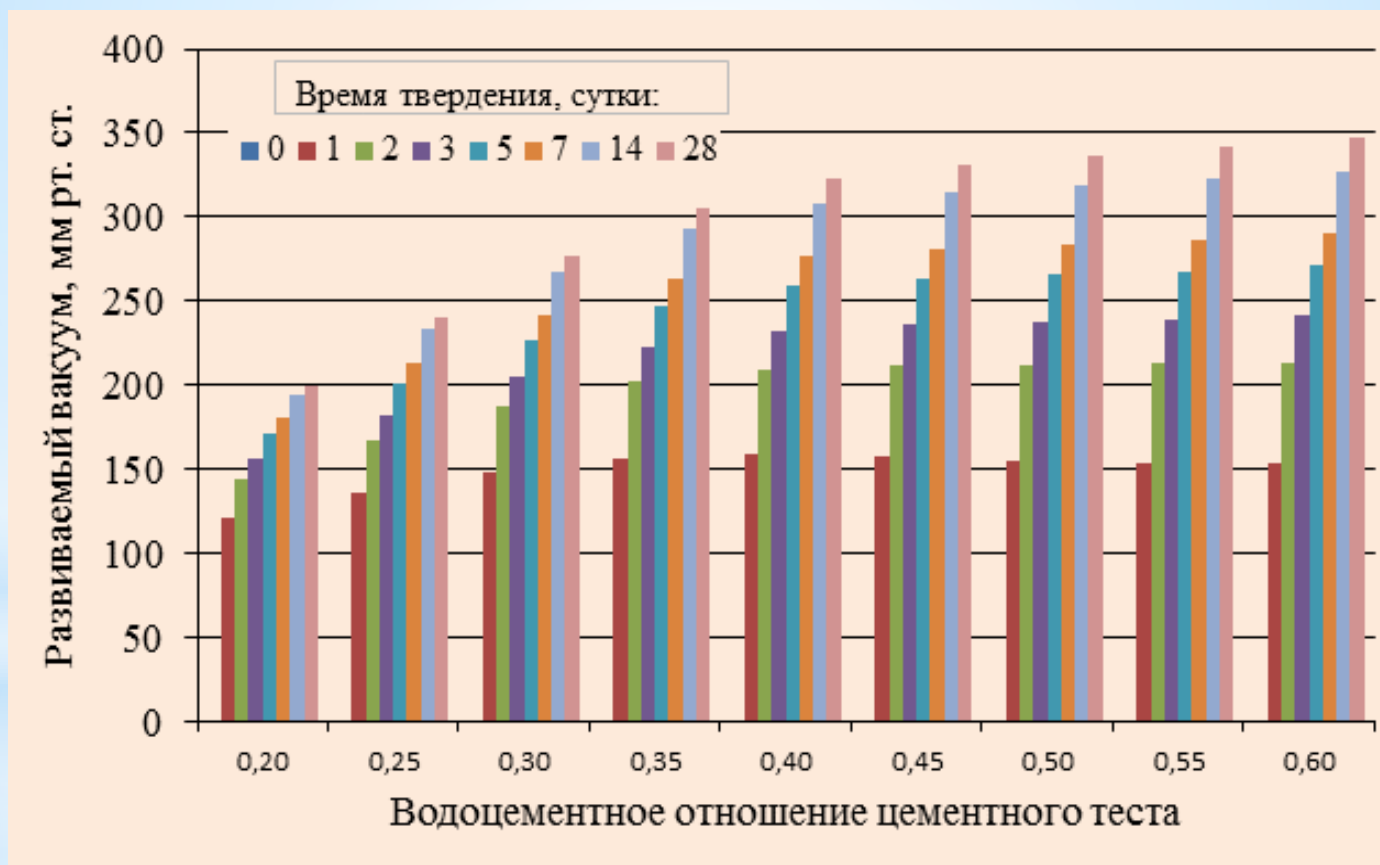
* Методика измерения разрежения в твердеющем цементном тесте



* Развитие вакуума в твердеющем цементном тесте



* Зависимость развиваемого в цементном камне разрежения от водоцементного отношения цементного теста



* Глубина пропитки бетона

$$\eta_p = 1,7 \cdot e^{-0,023t} \cdot (1 + 0,00006 \cdot (t + 10) \cdot C^{1,5}) \quad \text{Вязкость раствора}$$

$$\rho = 7,6 \cdot C + 1000 \quad \text{Плотность раствора}$$

где t - температура поверхности покрытия, °C;

C - суммарная концентрация пропитывающего раствора, %.

$$k_{\text{нп}} = 1 + \sqrt{0,001 \cdot \tau_{\text{нп}}}$$

Коэффициент, учитывающий увеличение глубины пропитки с возрастанием времени от окончания формования до начала пропитки ($\tau_{\text{нп}}$)

$$\delta = \frac{k_t \cdot k_{\text{нп}} \cdot \tau \cdot \Pi_k^2 \cdot P_k}{\eta \cdot (1 - \Pi_k)^2 \cdot S_{\text{ц}}}$$

Окончательное уравнение

$$l = 11,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\beta} \cdot \varepsilon_{\text{цт}} \cdot \sqrt{\frac{P_c \cdot \tau}{\rho_{\text{ж}} \cdot \mu_{\text{д}}}} \quad \text{мм}$$

где β - эмпирический поправочный коэффициент, Н/м³;

$\varepsilon_{\text{цт}}$ - коэффициент пористости цементного теста (камня), д. ед.;

P_c - разрежение в теле бетона, Па;

τ - время пропитки, с;

$\rho_{\text{ж}}$ - плотность раствора, Н/м³;

$\mu_{\text{д}}$ - динамическая вязкость фильтрующей жидкости, Н·с/м².

Уравнение

Батяновского Э.И. и
Эгбалник Саназ в мм

* Пропитка при температуре 5 градусов

Температура, оС	Время пропитки, ч	Толщина покрытия, см	Глубина пропитки, мм
5	1	5	0,0
		10	0,1
		20	0,1
		40	0,2
	6	5	0,2
		10	0,4
		20	0,7
		40	1,4
	12	5	0,2
		10	0,7
		20	1,4
		40	2,8
	18	5	0,5
		10	1,1
		20	2,1
		40	4,2
	24	5	0,7
		10	1,4
		20	2,8
		40	5,6

Данные приведены для: бетон класса по прочности на сжатие В40; марка бетонной смеси по удобоукладываемости П1; цемент марки М500; твердение бетона 1 сутки; пластифицирующая добавка гиперпластификатор «Стахемент – 200 – М Ж30» 0,2 % от массы цемента использована для повышения характеристик бетона; воздухововлекающей добавки нет

* Пропитка при температуре 10 градусов

Температура, оС	Время пропитки, ч	Толщина покрытия, см	Глубина пропитки, мм
10	1	5	0,0
		10	0,1
		20	0,1
		40	0,3
	6	5	0,2
		10	0,4
		20	0,8
		40	1,6
	12	5	0,4
		10	0,8
		20	1,6
		40	3,1
	18	5	0,6
		10	1,2
		20	2,3
		40	4,7
	24	5	0,8
		10	1,6
		20	3,1
		40	6,2

* Пропитка при температуре 20 градусов

Температура, оС	Время пропитки, ч	Толщина покрытия, см	Глубина пропитки, мм
20	1	5	0,0
		10	0,1
		20	0,2
		40	0,3
	6	5	0,2
		10	0,5
		20	1,0
		40	1,9
	12	5	0,5
		10	1,0
		20	2,1
		40	4,1
	18	5	0,7
		10	1,4
		20	2,9
		40	5,7
	24	5	1,0
		10	1,9
		20	3,8
		40	7,7

* Пропитка при температуре 30 градусов

Температура, °C	Время пропитки, ч	Толщина покрытия, см	Глубина пропитки, мм
30	1	5	0,0
		10	0,1
		20	0,2
		40	0,4
	6	5	0,3
		10	0,6
		20	1,2
		40	2,3
	12	5	0,6
		10	1,2
		20	2,3
		40	4,7
	18	5	0,9
		10	1,8
		20	3,5
		40	7,0
	24	5	1,2
		10	2,3
		20	4,7
		40	9,4

* Параметры формирования дорожного полотна

Применяемая бетонная смесь имела следующий состав, кг/м³:

Портландцемент ПЦ500-Д0-Н	- 395
Вода	- 150
Щебень смеси фракций 5-20мм 3 группы	- 1140
Песок средней крупности 1 класса	- 730
Пластификатор «Линамикс П-120»	- 4,79 (1,21% от массы цемента)
Воздухововлекающая добавка «Хидетал П-8»	- 1,44 (0,36% от массы цемента).

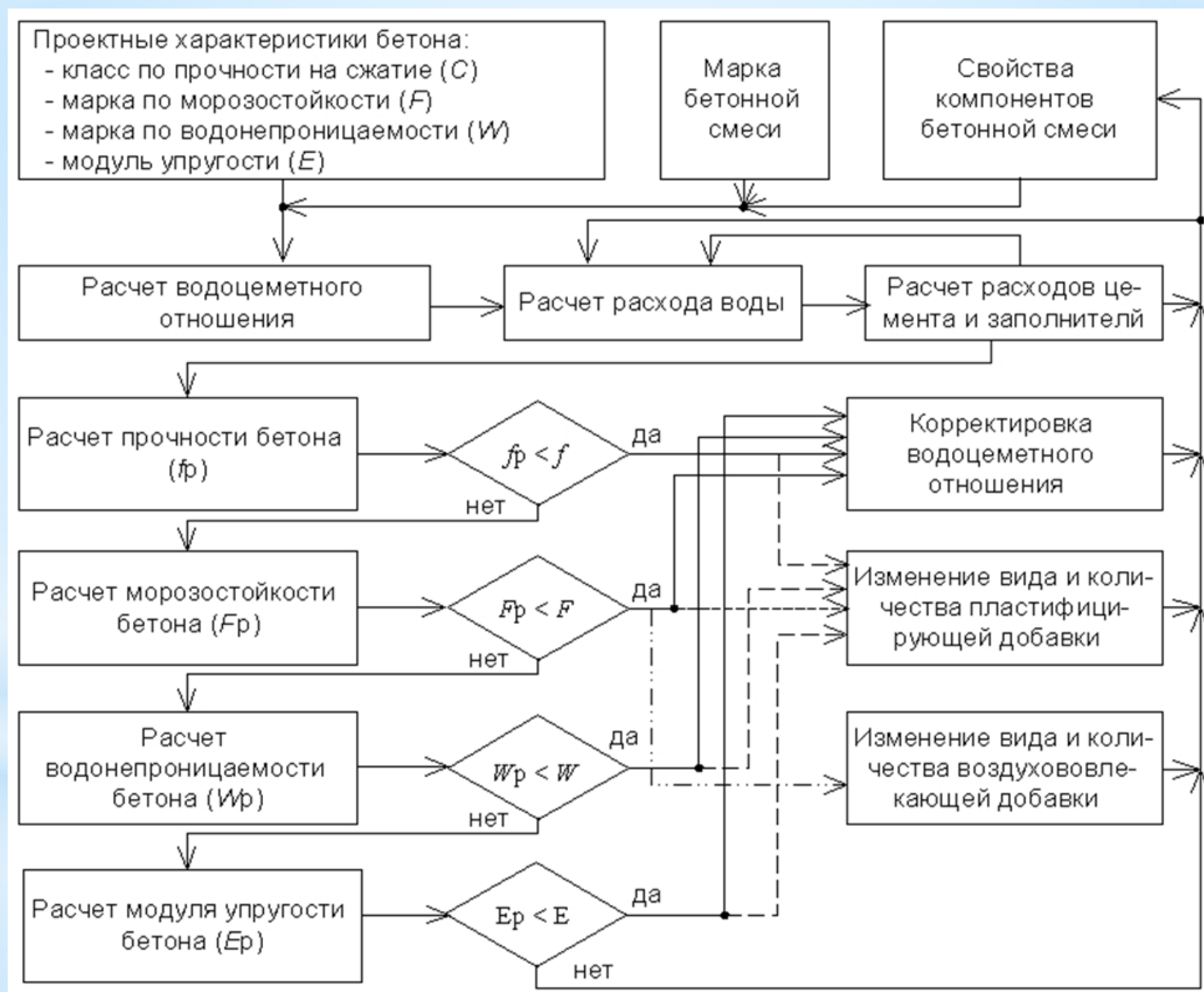
На объект строительства бетонная смесь доставлялась с подвижностью по осадке конуса равной 3,0 – 4,5 см, с объемом вовлеченного воздуха 5,9 – 6,2%.

Учитывая фактическое значение водоцементного отношения в бетонной смеси и ее удобоукладываемость, были выбраны следующие оптимальные параметры виброуплотнения:

- амплитуда колебаний - 3,20мм;
- частота колебаний - 7850 кол./мин. (130,8Гц);
- величина кинетической энергии вибратора – 450 Нсм.

* Структурная схема расчета состава бетона

21



* Структурная схема расчета глубины пропитки поверхностного слоя твердеющего бетона





Проектирование состава бетона дорожного полотна

Повышение долговечности цементно-бетонного дорожного покрытия

Файл Состав Пропитка Разработчики О программе ?

Проектирование состава бетона

Требования к бетону

Класс бетона по прочности: **C25/30**

Коэффициент вариации, %: **13.5**

Требуемая прочность бетона, МПа: **38.5**

Марка по морозостойкости: **100**

Марка по водонепроницаемости: **6**

Требования к бетонной смеси

☒ Подвижность, см: **2**

☐ Жесткость, с

Цемент

Марка цемента: **500**

Нормальная густота, %: **26**

Плотность, кг/м куб: **3070**

Добавки

Пластифицирующая: ☐ нет ☒ есть

Цель введения: ☐ повышение физико-механических характеристик ☒ экономия цемента

Гипер Стахемент-2000-М Ж30

Дозировка, %: **0.25**

Воздухововлекающая: ☐ нет ☒ есть

Содержание воздуха, %: **3.5**

Состав бетона, кг/м куб

Цемент	374	Щебень	1152
Песок	769	Вода	176
В/Ц	0.47	Плотность	2445

Расчетные характеристики бетона

Прочность, МПа	38.5	F100
Модуль упругости, ГПа	37.51	W6

* Расчет глубины пропитки поверхностного слоя твердеющего бетона

 Повышение долговечности цементно-бетонного дорожного покрытия

Файл Состав Пропитка Разработчики О программе ?

Параметры пропитки бетона

Минералогический состав, %

C_3S	56	C_3A	4
C_2S	21	C_4AF	15
SO_3	2		
Удельная поверхность, м кв/кг	320		

Технологические особенности пропитки

Толщина покрытия, см	20
Продолжительность пропитки	сутки 0 часы 21
Начало пропитки, часы	6
Температура поверхности покрытия, град С	15
Концентрация раствора сульфата натрия, %	4
Концентрация раствора технической соды, %	9

Технологические особенности твердения

Время твердения бетона	сутки 3 часы 22
Усредненная температура твердения, град С	20
Прочность бетона, МПа	28.4

Структурные характеристики бетона и глубина пропитки поверхностного слоя покрытия

Степень гидратации цемента, %	52.1	Контракция, мл/ 100 г цемента	12.2
Пористость по объему, %:	гелевая 3.7	капиллярная 10.2	общая 14
Разрежение в твердеющем бетоне, мм. рт. ст.	382.7	Глубина пропитки поверхностного слоя твердеющего бетона, мм	5.2

* Регистрация программы

 БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

СВИДЕТЕЛЬСТВО
о регистрации компьютерной программы
№ 016

Наименование компьютерной программы
SUB

Правообладатель компьютерной программы:
Белорусский национальный технический университет

Год создания компьютерной программы:
2020

Автор (Авторы) компьютерной программы:
Саканов Дархан Куандыкович
Бабицкий Вячеслав Вацлавович

Дата внесения записи в Реестр служебных компьютерных программ:
15.10.2020

Проректор по научной
работе

А.М. Маляревич

Настоящее свидетельство выдано на основании материалов, представленных автором (авторами)
компьютерной программы



Спасибо за внимание!