

ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО БЕТОНА И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

**ПРИБОР И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА БОКОВОГО ДАВЛЕНИЯ
БЕТОННОЙ СМЕСИ НА ОПАЛУБКУ**

**METHOD AND DEVICE FOR MEASUREMENT THE COEFFICIENT OF LATERAL
PRESSURE OF CONCRETE MIX ON FORMWORK.**

Марковский М.Ф., канд. техн. наук, директор РУП “Институт БелНИИС”
Копылов Ю.Б., зав. лабораторией РУП “Институт БелНИИС”

АННОТАЦИЯ

Разработаны прибор и методика измерения коэффициента бокового давления бетонной смеси на опалубку во времени. Исследована кинетика изменения бокового давления. Определены сроки схватывания бетонных смесей.

ABSTRACT

Method and device for measurement the coefficient of lateral pressure of concrete mix on formwork in time are investigated. Kinetics of lateral pressure change in time is researched. Terms of concrete mixes settings are defined.

ВВЕДЕНИЕ

С начала XX-го столетия боковое давление бетонной смеси на вертикальные стенки опалубки постоянно исследуется, разрабатываются расчетные модели и сравниваются с экспериментальными данными. Однако до настоящего времени не разработаны бесспорные методики расчета бокового давления бетонной смеси на опалубку. Теоретические и эмпирические подходы дают разноречивые результаты.

С целью оптимизации проектирования опалубки и разработки технологии бетонирования необходим более точный анализ кинетики процесса твердения бетонной смеси и, как следствие, кинетики бокового давления смеси на опалубку.

1. Распределение бокового давления бетонной смеси на вертикальную опалубку стен

На начальном этапе бетонирования характер распределения давления бетонной смеси по высоте опалубки близок к гидростатическому распределению.

По мере гидратации вяжущего происходит рост прочности свежееуложенного бетона до тех пор, пока в конце процесса твердения бетона t_E , когда коэффициент бокового давления достигает нуля, он может выдержать любую нагрузку от собственного веса вышележащего бетона без учета сопротивления опалубки. Этот параметр t_E использован в ряде работ, а также при разработке немецких норм по расчету бокового давления бетонной смеси [1].

Временной фактор оказывает влияние на рост реологических параметров бетонной смеси в объеме и пристенном слое и соответственно на изменение коэффициента бокового давления ($\xi(t)$)

$$\xi(t) = \frac{\sigma_y(t)}{\sigma_x(t)} = \frac{\sigma_z(t)}{\sigma_x(t)}, \quad (1)$$

где $\sigma_x(t)$, $\sigma_y(t)$, $\sigma_z(t)$ – соответственно вертикальное и боковое давление бетонной смеси.

Основным параметром, существенно влияющим на падение бокового давления, является изменение самого коэффициента бокового давления $\xi(t)$. Единого мнения об изменении этого показателя во времени нет и по настоящее время. В более ранних работах [2, 3] с целью качественного и количественного описания падения бокового давления использовали экспоненциальную зависимость.

Нами предложена методика расчета бокового давления бетонной смеси в зависимости от ее плотности, скорости укладки и реологических характеристик. Получена максимальная величина бокового давления бетонной смеси для опалубки стены (σ_y^{max}) [4, 5]

$$\sigma_y^{max} = \xi_o \cdot V \cdot \left(\gamma_{см} - \frac{2 \cdot \tau_{o.n.c}}{a} \right) \cdot \left[\frac{t_E}{2} - \frac{\alpha_t \cdot t_E}{3 \cdot (\gamma_{см} \cdot a - 2 \cdot \tau_{o.n.c})} \right], \quad (2)$$

где ξ_o – начальный коэффициент бокового давления бетонной смеси при $t=0$;

$\gamma_{см}$ – средняя плотность бетонной смеси;

$\tau_{o.n.c}$ – предельное напряжение сдвига бетонной смеси в пристенном слое в начальный период укладки;

a – толщина стены;

α_t – эмпирический коэффициент, учитывающий рост предельного напряжения сдвига $\tau_{o.n.c}$ во времени.

Хотя теоретически возможно моделировать влияние отдельных факторов на боковое давление функциями более сложными, что вызывает затруднения и может занять много времени, и все же не обязательно даст точный результат. Поэтому мы ограничиваемся на данном этапе разработкой упрощенных и более практичных методов расчета. По мере накопления экспериментальных данных по изменению реологических параметров бетонных смесей во времени возможно продолжить дальнейшие исследования с применением более сложных функциональных зависимостей.

2. Прибор и методика измерения коэффициента бокового давления бетонной смеси на опалубку

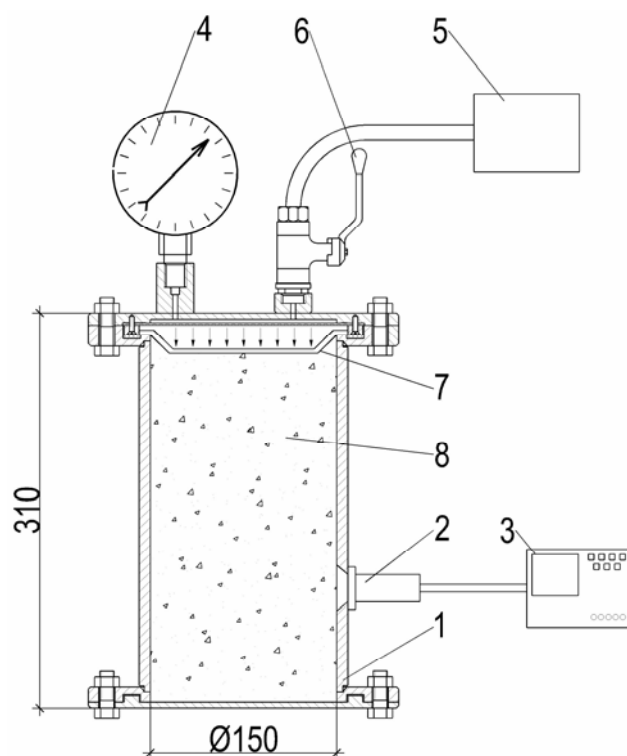
В зарубежной практике методики и оборудование для исследования бокового давления бетонной смеси у различных авторов разнятся.

Рядом исследователей применена экспериментальная установка из трубы, внутренним диаметром 200 мм и высотой 2100 мм [6]. Давление бетонной смеси на стенки трубы измеряли датчиками давления, диаметром 20 мм, расположенными по высоте установки. Датчики давления перед каждым опытом тарировали. В установку заливалась бетонная смесь и исследовалось боковое давление по высоте трубы и кинетика его снижения во времени.

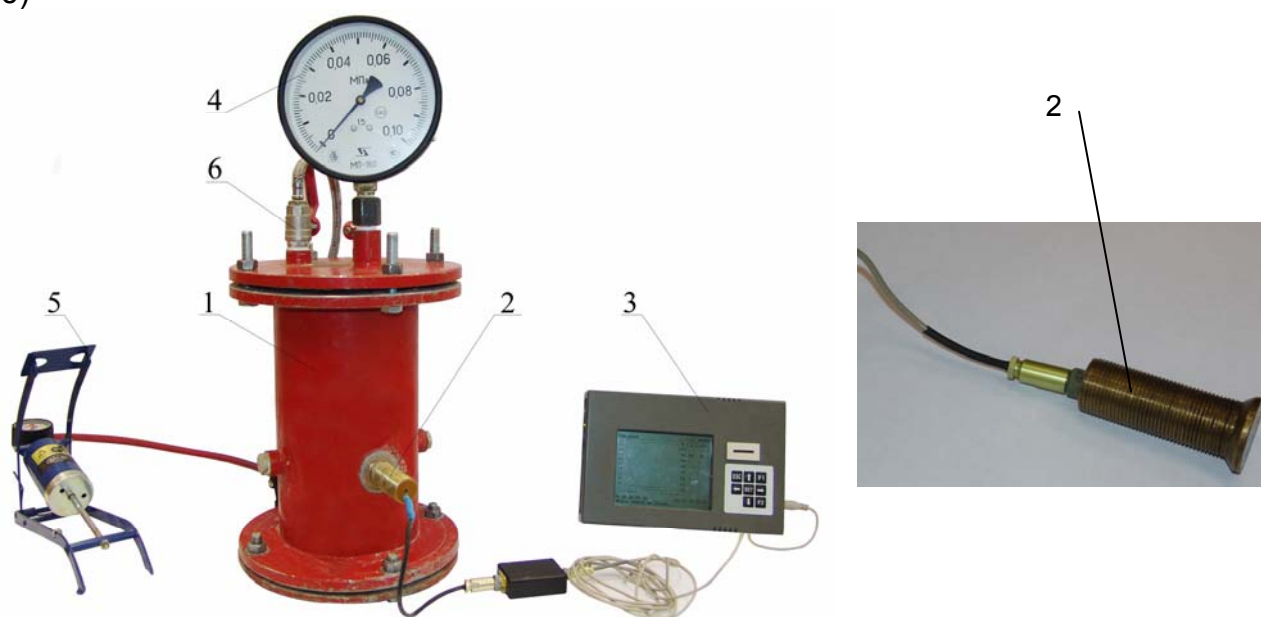
В работе [7] упоминается об экспериментальных трубах диаметром 200 мм, но высотой 1000 или 2800 мм. Французские ученые используют аналогичные установки, но с несколько другими размерами: внутренний диаметр трубы 100 мм и высота 1000 мм [8, 9]. В этих установках применены датчики давления, специально разработанные для исследований. Датчики состоят из двух взаимосвязанных измерительных камер. Первая камера оборудована индукционным датчиком смещения, связанным с латексной мембраной. Вторая камера оборудована датчиком абсолютного давления, соединенным с распределителем сжатого воздуха. Регулирование перемещений мембраны совершается путем изменения воздушного давления в двух камерах. Это давление должно быть постоянно равным давлению бетонной смеси на опалубку.

Авторами разработан прибор и отработана методика определения коэффициента бокового давления бетонной смеси и кинетики его снижения. В основу прибора положены недренированные испытания образцов бетонной смеси с максимальным размером зерен крупного заполнителя 20 мм при различных давлениях с замером датчиками бокового давления на стенки прибора (рис. 1). В отличие от зарубежных методик в предложенном приборе практически исключается влияние сопротивления сдвига бетонной смеси по трубе.

a)



б)



- 1 – корпус; 2 – датчик давления; 3 – регистрирующая аппаратура;
4 – образцовый манометр; 5 – насос; 6 – штуцер с краном;
7 – резиновая диафрагма; 8 – бетонная смесь

Рисунок 1 – Схема (а) и общий вид (б) прибора для измерения коэффициента бокового давления бетонной смеси

С целью моделирования различной высоты бетонирования в опалубке в приборе создается избыточное давление на образец бетонной смеси с помощью сжатого воздуха. Измерение бокового давления бетонной смеси на стенки прибора производили специально разработанными датчиками с рабочей поверхностью диаметром 35 мм. Диапазон измеряемого давления 0 – 150 кПа. Датчик также синхронно измеряет температуру бетонной смеси. Регистрация давления и температуры производится автоматически. Измерения выполняли периодически при различных значениях избыточного давления. При достижении в датчике нулевого значения бокового давления испытания завершали.

Для приготовления бетонных смесей применялись следующие материалы и добавки:

- портландцемент ПЦ 500-Д0 ОАО “Красносельскстройматериалы”. Сроки схватывания цемента: начало – 3 ч 20 мин.; конец – 5 ч;
- гранитный щебень фракции 5-20 мм РУПП “Гранит”;
- песок с модулем крупности $M=3,06$ ДСЗ “Крапужино”;
- добавка-суперпластификатор “С-3” производства ЗАО “Владимирский ЖБК” (РФ);
- комплексная добавка-ускоритель “Суперпласт РТ” производства ЗАО “Владимирский ЖБК” (РФ);
- комплексная добавка-замедлитель “Мегалит С-3 МЛ” производства ЗАО “Владимирский ЖБК” (РФ);
- добавка-гиперпластификатор ГП-1 производства ООО “Агротехноминерал” (РБ).

Составы бетонных смесей, использованных при исследовании коэффициента бокового давления приведены в таблице 1*.

Таблица 1 – Составы бетонных смесей, используемых при исследовании коэффициента бокового давления

Номер состава	Расход цемента на 1 м ³ бетонной, кг	В/Ц	Добавка	Подвижность смеси, см
1	480	0,44	Без добавки	12 (П-3)
2	486	0,37	С-3	21 (П-5)
3	486	0,37	Суперпласт РТ	21 (П-5)
4	486	0,37	Мегалит С-3 МЛ	21 (П-5)
5	440	0,407	ГП-1	РК=60 (П-5)

После приготовления бетонной смеси для составов №1-4 определяли осадку, а для состава №5 – распыл конуса и помещали смесь в прибор. В течение первых 3 часов от момента затворения бетонной смеси испытания не проводили, чтобы не вызвать ее расслоения.

3. Параметр схватывания t_E

Параметр схватывания бетонной смеси t_E является весьма важной характеристикой для прогнозирования изменения бокового давления во времени. Для реологического описания бетонную смесь можно рассматривать как двухфазную систему, состоящую из инертного заполнителя и вязкопластичного цементного геля. Цементный гель состоит из цемента, воды и воздушных пустот. В начальный период цементный гель является деформируемой средой. По мере гидратации цемента пластичная бетонная смесь приобретает более высокую прочность на сдвиг, способную выдерживать вертикальную нагрузку, и соответственно, уменьшать боковое давление. Скорость гидратации зависит от вида цемента, водоцементного отношения, температуры и наличия химических добавок.

* Составы бетонных смесей были предоставлены отделом технологии бетонов и растворов РУП “Институт БелНИИС”.

Определение сроков схватывания цементного геля в бетонной смеси вызывает затруднения методического характера. Поэтому до сих пор отсутствует общепринятая отечественная методика определения столь важного параметра бетонной смеси. Время начала и конца схватывания бетонной смеси нами определялось в соответствии с американским стандартом ASTM: C 403/C 403M – 05 [10].

Испытания отсеченного из бетонной смеси раствора производят пенетрометром (рис. 2) через определенные промежутки времени. Строится график сопротивлений проникновения наконечника пенетрометра во времени. Время в минутах начала схватывания определяется при сопротивлении проникновению равному 500 фунтам на квадратный дюйм (3,5 МПа), а время окончания схватывания – при 4000 фунтах на квадратный дюйм (27,6 МПа) (рис. 3).

Испытания по определению сроков схватывания выполняли параллельно с исследованием падения бокового давления на одинаковых составах бетонной смеси и постоянной температуре.



Рисунок 2 – Пенетрометры для определения сроков начала и конца схватывания бетонной смеси по ASTM: C 403/C 403M – 05

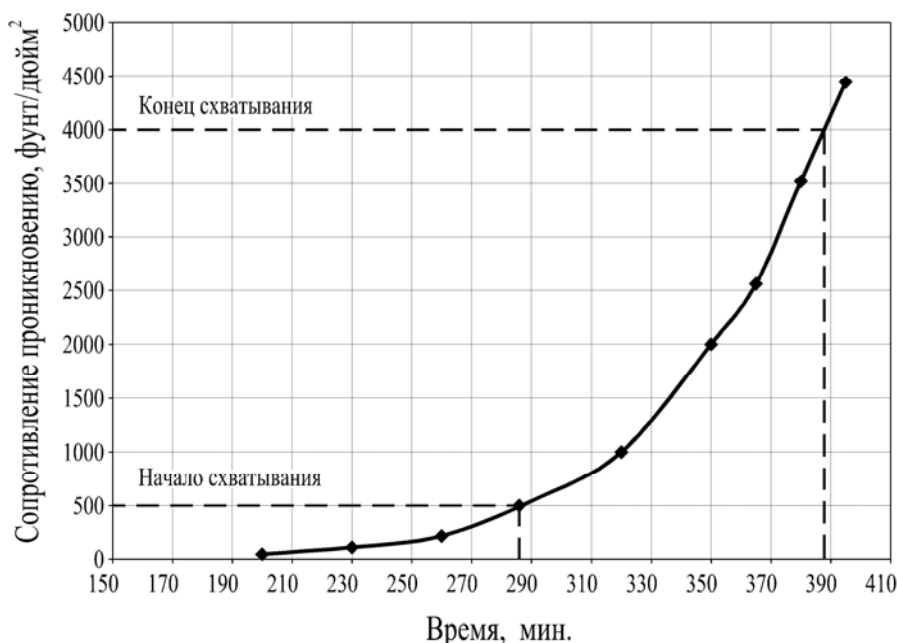


Рисунок 3 – График значений сопротивления проникновения пенетрометра

4. Результаты экспериментальных исследований

Результаты экспериментальных исследований изменения бокового давления бетонных смесей во времени приведены на рис. 4-8*.

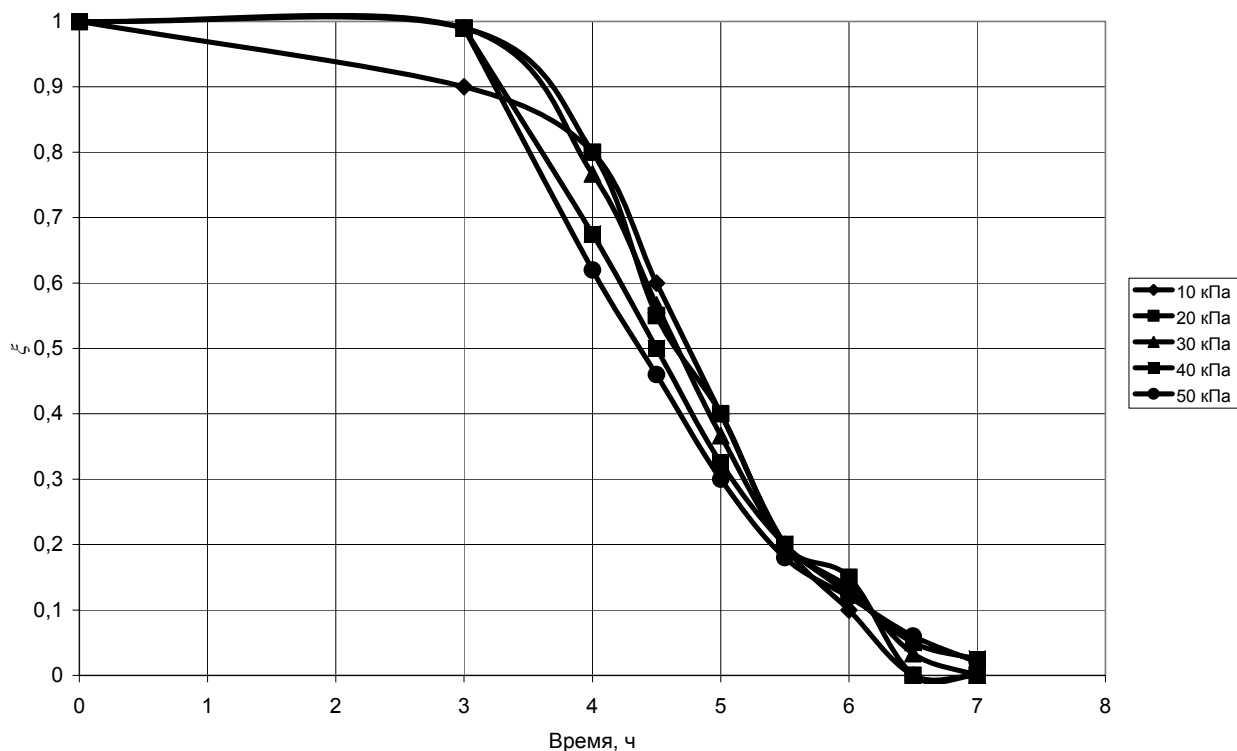


Рисунок 4 – Изменение коэффициента бокового давления ξ для бетонной смеси состава №1 без добавки при избыточном давлении 10-50 кПа

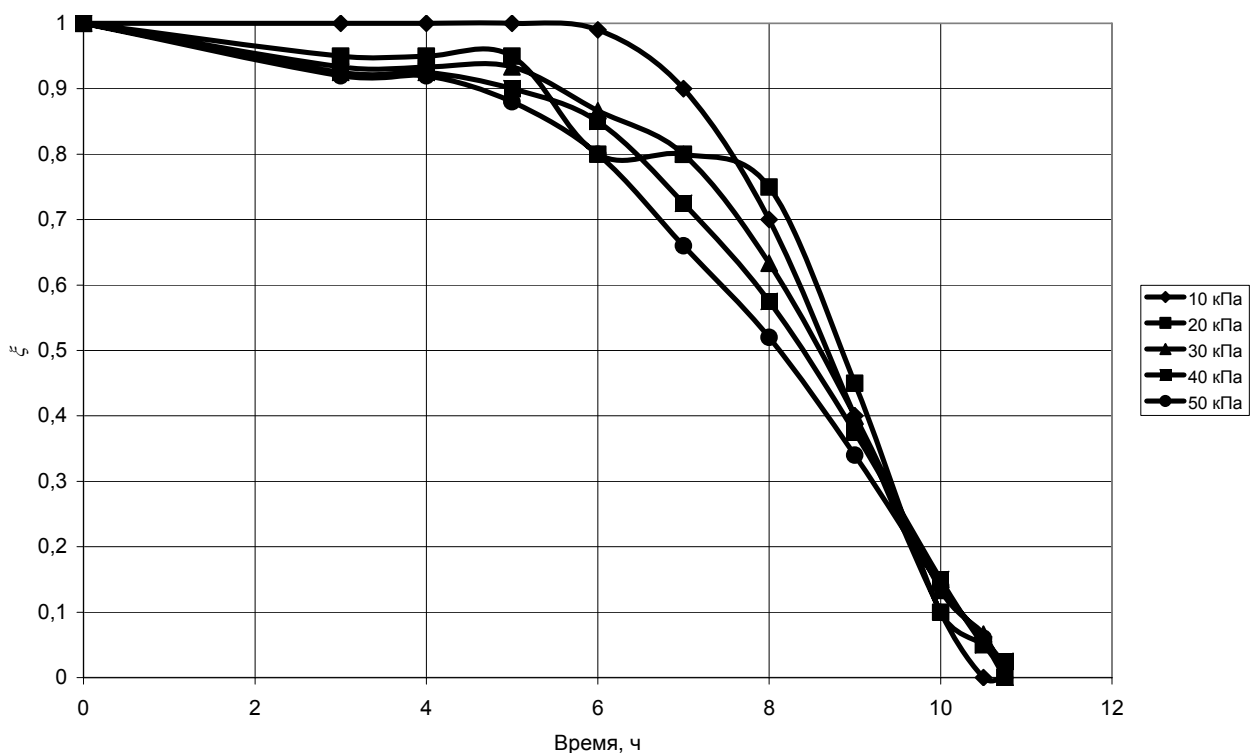


Рисунок 5 – Изменение коэффициента бокового давления ξ для бетонной смеси состава №2 с добавкой-суперпластификатором С-3 при избыточном давлении 10-50 кПа

* В экспериментальных исследованиях принимал участие инженер-технолог Попко Р.С.

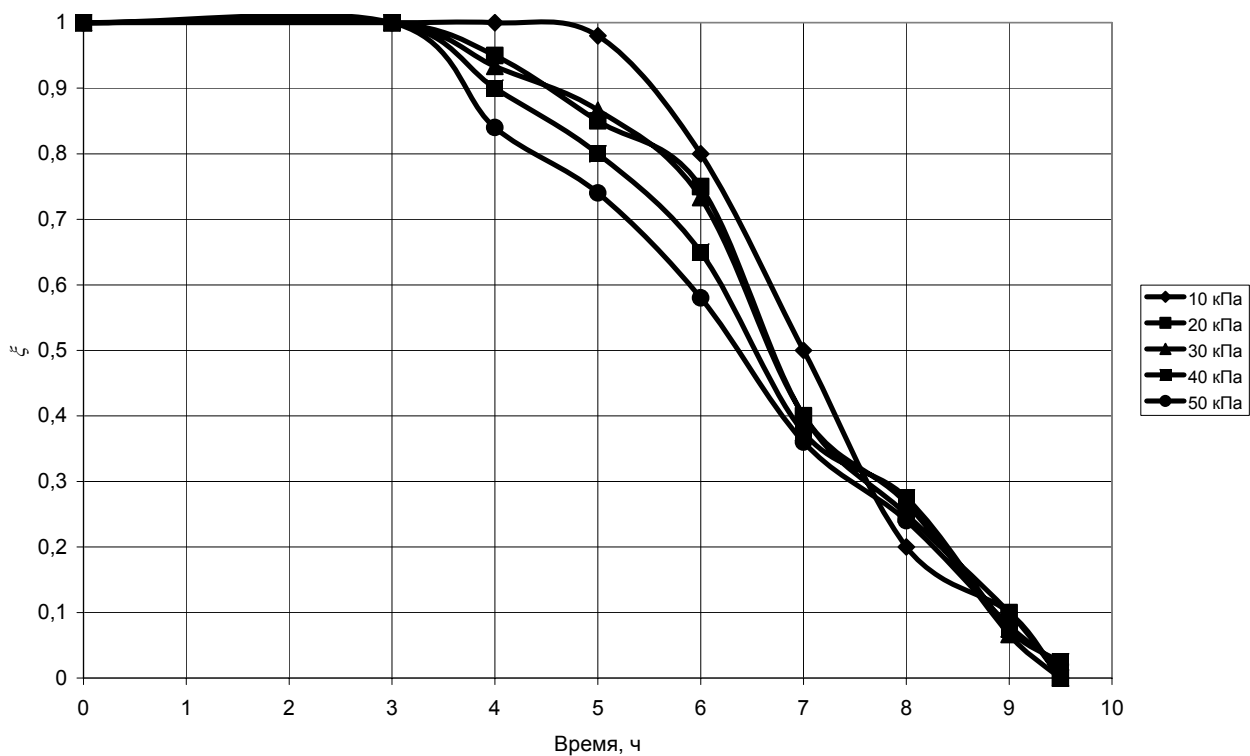


Рисунок 6 – Изменение коэффициента бокового давления ξ для бетонной смеси состава №3 с добавкой-ускорителем Суперпласт РТ при избыточном давлении 10-50 кПа

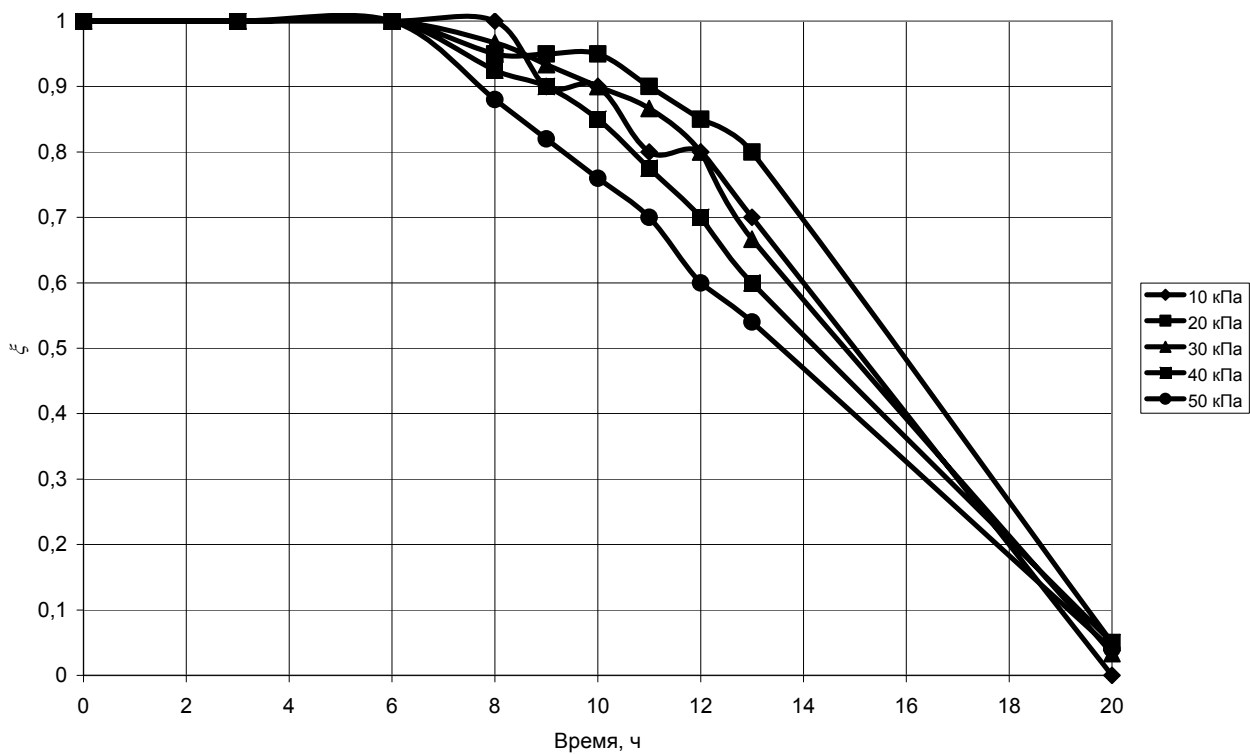


Рисунок 7 – Изменение коэффициента бокового давления ξ для бетонной смеси состава №4 с добавкой-замедлителем Мегалит С-3 МЛ при избыточном давлении 10-50 кПа

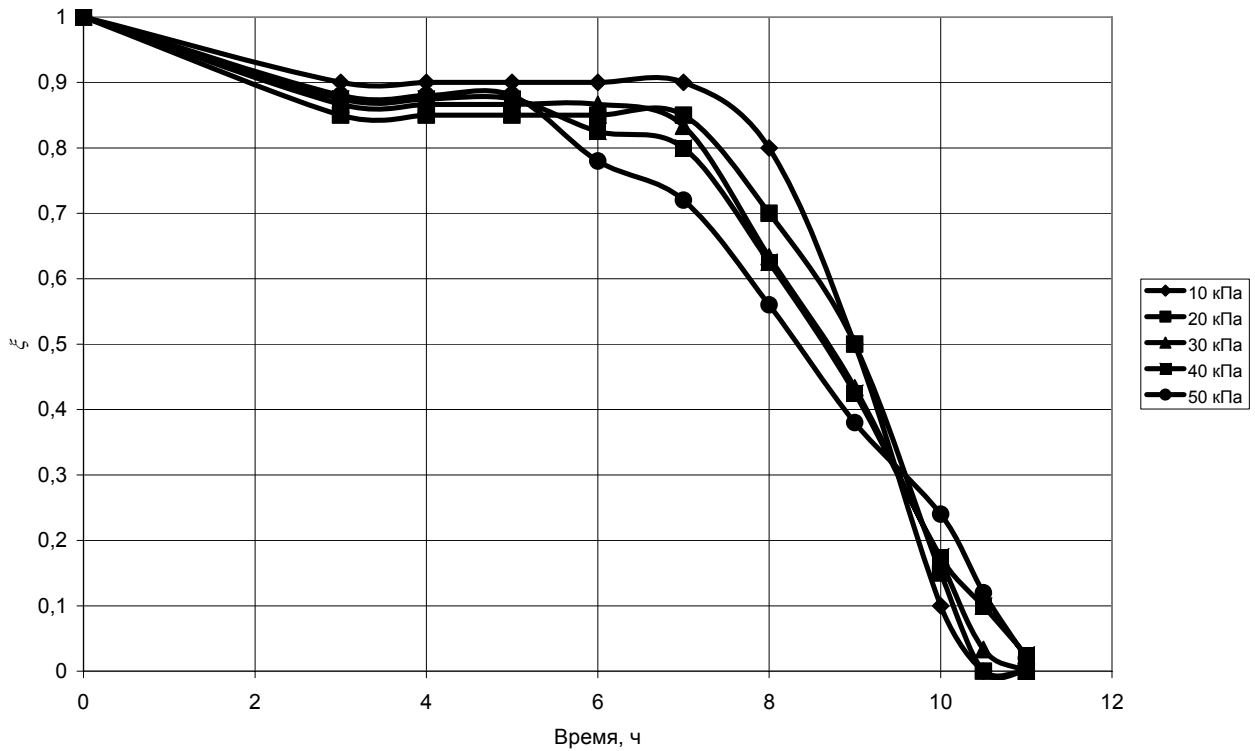


Рисунок 8 – Изменение коэффициента бокового давления ξ для самоуплотняющейся бетонной смеси состава №5 с добавкой-гиперпластификатором ГП-1 при избыточном давлении 10-50 кПа

Для сравнительного анализа приведем график изменения коэффициента бокового давления бетонных смесей ξ составов №1-5 за время t_E по усредненному значению избыточного давления (рис. 9).

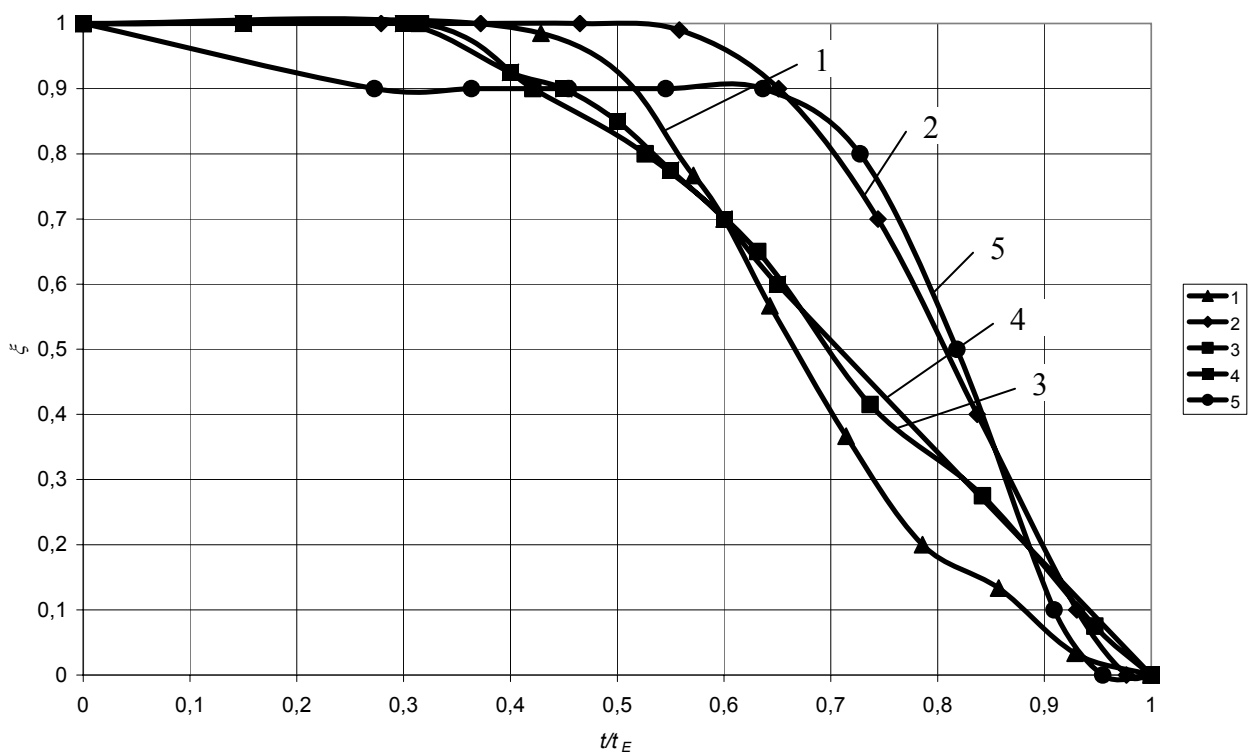


Рисунок 9 – Изменение коэффициента бокового давления ξ за период t_E для бетонных смесей составов 1-5 соответственно

На приведенных графиках видно, что время достижения нулевого значения бокового давления для смеси состава №2 с добавкой-суперпластификатором составляет ориентировочно 10.5 ч, для смеси состава №3 с комплексной добавкой-ускорителем ориентировочно уже составляет 9.5 ч, для смеси состава №4 с комплексной добавкой-замедлителем – 20 ч.

Результаты испытаний показывают, что на кинетику изменения бокового давления во времени для высокоподвижных смесей значительное влияние оказывает вид химической добавки. Для бетонной смеси состава №1 без модификаторов падение бокового давления начинается с 3 ч и завершается при 7 ч. Введение суперпластификатора С-3 ускоряет процесс роста пластической прочности бетона в начальный период и соответственно снижается боковое давление смеси. Сопоставление кинетики падения бокового давления со сроками схватывания смесей показывает, что окончание схватывания коррелируется с периодом t_E . Начало схватывания бетонной смеси приходится на спадающую ветвь изменения бокового давления.

Введение в бетонную смесь замедлителя твердения существенно сказывается на кинетике падения бокового давления, и этот процесс удлиняется (см. рис. 7). Аналогично для этой смеси удлиняется период t_E и окончание схватывания. Самоуплотняющаяся бетонная смесь ведет себя аналогично вышеуказанным, только со своими параметрами.

Сразу после укладки модифицированные смеси вызывают высокое первоначальное давление, близкое к гидростатическому. Через определенный промежуток времени начинается акцентированная скорость падения бокового давления. Оценка времени t_E имеет большое значение для разработки графиков работ по укладке бетонной смеси с учетом допускаемых нагрузок на опалубку. Минимальное время для снятия опалубки зависит от прочности бетона и нагрузки, которой он был подвергнут.

Сроки схватывания исследованных бетонных смесей, определенные по методике ASTM: C 403/C 403M – 05, приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Сроки схватывания бетонных смесей составов № 1-5

Номер состава	Добавка	Сроки схватывания бетонных смесей	
		Начало	Конец
1	Без добавки	5 ч 01 мин	7 ч 02 мин
2	С-3	8 ч 11 мин	10 ч 11 мин
3	Суперпласт РТ	7 ч 42 мин	9 ч 47 мин
4	Мегалит С-3 МЛ	15 ч 34 мин	18 ч 21 мин
5	ГП-1	8 ч 56 мин	10 ч 56 мин

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны прибор и методика измерения коэффициента бокового давления бетонной смеси на опалубку, позволяющие исследовать кинетику изменения бокового давления бетонной смеси во времени.

2. Измерение сроков начала и конца схватывания бетонных смесей целесообразно производить по методике ASTM: C 403/C 403M – 05.

3. Введение химических модификаторов существенно влияет на кинетику твердения бетона. Например, введение в состав смеси замедлителя твердения приводит к сдвигу начального перегиба графиков бокового давления бетонной смеси с 3 ч для смеси без добавки до 6-8 часов для смеси с замедлителем твердения бетона, а времени достижения нулевого значения бокового давления с 7 ч до 20 ч соответственно.

4. Изменение коэффициента бокового давления ξ за период схватывания t_E имеет общий характер для исследованных составов №1-5.

5. Начальный перегиб графиков изменения бокового давления не совпадает с определенным по методике ASTM временем начала схватывания бетонных смесей. Конец схватывания бетонных смесей, определенный по методике ASTM: C 403/C 403M – 05 коррелируется со временем достижения нулевого значения бокового давления.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Specht M. Der Frischbetondruck nach DIN 18218 – die Grundlagen und die wichtigsten Festlegungen // Bautechnik (58), 1981. - № 8. – S. 253 – 261.

2. Ertingshausen H. Über den Schalungsdruck von Frischbeton.- Inst. f. Baustoffkunde und Stahlbetonbau der TH, 1965.-98 s.
3. Röhling S. Der Frischbeton seitendruck auf lotrechte Wandschalungen // Wissenheftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig. – H2-1975, S. 73 – 77.
4. Марковский, М.Ф. Распределение бетонной смеси на вертикальную опалубку в процессе безвибрационной укладки// Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: сб. тр. XVI междунар. науч.-метод. семинара. - Брест, 2009. - С.85-90.
5. Марковский, М.Ф. Влияние интенсивности бетонирования и внутреннего вибрирования на боковое давление бетонной смеси на опалубку // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: сб. тр. XVI междунар. науч.-метод. семинара. - Брест, 2009. - С.141-147.
6. Assad I., Khayat K., Mesbah H. Variation of formwork pressure with thixotropy of self – consolidating concrete //ACI Materials Journal / January – February 2003. – P.p. 29-37.
7. Assaad J. Khaut K. Variations of lateral and pore water pressure of self-consolidating concrete at early age // ACJ materials Journal/July-August 2004. – p.p. 310 - 317.
8. Amziane S., Andriamanantsilavo R., Baudeau P. An experimental study on the pressure of cement based materials against formwork // 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, June 2-5, 2002., Columbia University New York, 8 p.p.
9. Andriamanantsilavo R. Comportement des matériaux cimentaires dans un coffrage: expérimentation, modélisation et simulation de la poussée et du processus de maturation: Docteur de L'Universite de Bretagne sud. – 2003. – 131 p.
10. ASTM Designation: C 403/c 403M-05. Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance.

источник: www.belniis.by