

2. Из полученных данных видно, что процессы структурообразования цементного теста в воде и в воздушной среде незначительно отличаются в начальные сроки (≈ 24 45 мин), однако затем наблюдается резкое опережение роста пластической прочности цементного теста, твердевшего в воздушной среде.

Заключение. Таким образом, мы предполагаем, что в цементном тесте вместо границы "сольватный слой — вода" на определенном этапе твердения, совпадающем с началом схватывания, образуется граница "сольватный слой — воздух", что резко увеличивает значение свободной энергии (σ) на границе раздела. И наоборот: цементное тесто, находящееся под водой, несмотря на пролонгирующую гидратацию, имеет постоянную подпитку водой, что поддерживает наличие раздела "сольватный слой — вода" и занижает значение пластической прочности системы.

Список цитированных источников

1. Ахвердов, И.Н. Высокопрочный бетон. — М., 1961. — 163 с
2. Методы исследования цементного камня и бетона / Под редакцией З.М. Ларионовой-И. Стройиздат, 1970 — 159 с
3. Якимович, В.Д. Аэротермоактивация цемента и наполнителей в бетонах: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук 1979 / В.Д. Якимович — Мн., 1990 — 173 с
4. Цементы. Методы определения нормальной плотности, сроков схватывания и равномерности изменения объема ГОСТ 310.3-76. — Введ. 01.01.78 — Москва / Министрство промышленности строительных материалов СССР, государственный комитет СССР по делам строительства, Министерство энергетики и электрификации СССР, 1978. — 9 с.

ДК 69.057.5:532.11:691.327

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ НА ВЕРТИКАЛЬНУЮ ОПАЛУБКУ СТЕН И КОЛОНН В ПРОЦЕССЕ БЕЗВИБРАЦИОННОЙ УКЛАДКИ

Марковский М.Ф.

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

В связи с возрастанием интенсивности бетонных работ и всего строительства, особая роль принадлежит опалубочной технике, стоимость которой может достигать 30–40% стоимости монолитных конструкций. Поэтому весьма важно, чтобы нагрузка на опалубку определялась более точно по нескольким причинам. Во-первых, современные высокие темпы возведения монолитных конструкций диктуют требования к повышенной несущей способности опалубки. Во-вторых, ошибки в подсчете давления на опалубку, особенно заниженные его значения, приводят к чрезмерной деформации опалубки и нарушению качества лицевых поверхностей бетона, а то и к аварийным ситуациям. И, наконец, расчет давлений на опалубку закладывается в реальные технологические параметры процесса возведения конструкций с тесной увязкой с сопутствующими технологиями арматурных и бетонных работ.

Анализ расчетных методов определения бокового давления на опалубку. К разработке расчетных методов многие ученые смогли приступить лишь тогда, когда появилась возможность более или менее точно измерить давление и изучить характер нагрузок, вызываемых давлением бетонной смеси на опалубку.

В 1965 г. Х. Эртингсхаузен [1] провел всеохватывающий обзор опубликованных экспериментальных данных (более 30 работ), в котором изложены различные подходы к оценке давления и установлению факторов, влияющих на боковое давление бетонной смеси на опалубку. Ноак, Р. Хофман, С. Маклин и др. [1] при оценке испытаний воспользовались законом бокового давления грунта.

Обстоятельная работа, проведенная С. Родиным в 1952 г. [1], содержит многочисленные описания испытаний, результаты измерений и оценки. Им установлено, что главными факторами давления на опалубку являются: скорость укладки бетонной смеси; температура бетонной смеси; метод уплотнения (вибрация или вручную); время схватывания бетонной смеси; состав и консистенция смеси; размер и форма опалубки.

Анализируя различные результаты измерений, он приходит к выводу, что вследствие влияния многих факторов боковое давление бетонной смеси на опалубку возможно отобразить лишь с применением эмпирических формул. Максимальное давление (P_{max}) для вибрируемой бетонной смеси для всех скоростей бетонирования (V) определяется по следующей формуле:

$$P_{max} = 39,2\sqrt[3]{V}, \text{ кН/м}^2. \quad (1)$$

По М. Шпехту [2] для бетонных смесей обычного состава от жесткой до пластичной консистенции максимальное давление равно

$$P_{max} = 7,5V + 21, \text{ кН/м}^2. \quad (2)$$

Т.А. Харрисон предлагает оценивать давление на опалубку через поровое давление в бетонной смеси (u) и доли напряжения (σ), воспринимаемого заполнителем смеси (λ) [5]

$$P = u + \lambda\sigma. \quad (3)$$

Следует отметить, что процесс исследования теории и практики расчета бокового давления бетонной смеси на опалубку не завершен, чему свидетельствуют многочисленные публикации по этой теме в зарубежной печати. Особенно отчетливо эта проблема обостряется при применении высокоподвижных и самоуплотняющихся смесей.

Таким образом, несмотря на все многочисленные усилия, приходится ограничиваться только приближенными значениями, которые пригодны для практических целей только в ограниченных пределах. Это обстоятельство является типичным при попытке комплексной оценки бокового давления бетонной смеси на опалубку, когда результаты прежних испытаний подвергаются каждый раз сомнению и проверке в последующих опытах.

Распределение давления бетонной смеси на вертикальную опалубку стен и колонн. Проблема расчета бокового давления бетонной смеси на опалубку многофакторна и сложна и требует тщательных теоретических методов решения. На наш взгляд, методы реологии бетонных смесей открывают широкие возможности для решения прикладных технологических задач, включая и распределение давления бетонной смеси на опалубку. Белорусская научная школа внесла существенный вклад в технологическую механику бетона [6, 7, 8].

Теоретическое исследование процесса заполнения опалубки бетонной смесью начинаем с протейших участков стены с вертикальными опалубками. За-

дачи о распределении давления при нагнетании снизу бетонной смеси в плоскопараллельное пространство с вертикальными стенками ранее рассматривались Н.П. Блещиком и его учениками. Выбор той или иной расчетной модели бокового давления бетонной смеси на опалубку для решения конкретных технологических задач связан с компромиссом между простотой решения и реалистичностью, достигнуть которого на практике, однако, удастся редко. Правильный учет явлений, происходящих как в самой бетонной смеси, так и на контакте с опалубкой, невозможен без учета реологических свойств бетонной смеси с учетом временного фактора.

Рассмотрим случай безвибрационной укладки высокоподвижной бетонной смеси в вертикальную прямоугольную опалубку размером в плане $L \times a$ или в круглую опалубку радиусом r (рис. 1). Далее мы используем координаты z по направлению ширины L ; y по направлению толщины a ; вертикальное направление x направлено вниз. Верх бетона - о плоскость $x = 0$; стены опалубки - это плоскости $z = \pm \frac{L}{2}$ и $y = \pm \frac{a}{2}$.

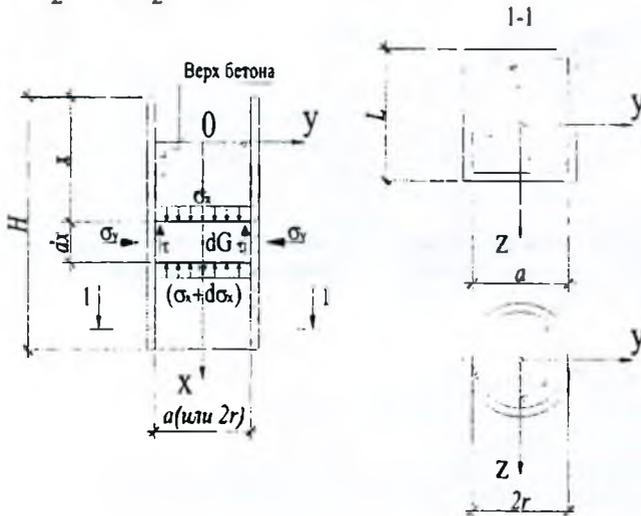


Рисунок 1 – Расчетная схема для определения давления бетонной смеси на вертикальную прямоугольную и круглую опалубку

Приняты следующие предпосылки и допущения:

- в опалубке отсутствует арматура;
- бетонная смесь представляет несжимаемую квазиоднородную среду;
- опалубку рассматриваем как абсолютно жесткую без учета ее деформаций и

перемещений (u), т.е. $u_x(x, y, \pm \frac{L}{2}) = u_y(x, \pm \frac{a}{2}, z) = 0$;

- влияние вибрации при послойной укладке не учитываем.

Поведение бетонной смеси в объеме и в пристенном слое в общем виде аппроксимируем средой Бингама

$$\tau = \tau_{св} + \eta \dot{\gamma}, \quad (4)$$

где τ – касательное напряжение;

$\tau_{0,св}$ – предельное напряжение сдвига (предел текучести) бетонной смеси в объеме;

η – вязкость смеси;

γ – градиент сдвига.

Поскольку процесс течения смеси в этой задаче не рассматривается, можно принять

$$\tau = \tau_{0,св}. \quad (5)$$

Вследствие того, что вертикальное сечение опалубки осесимметричное, выделенный элемент смеси под действием сил давления, собственного веса и реакций стенок опалубки находится в состоянии предельного равновесия.

Взаимодействие бетонной смеси с опалубкой происходит через пристенный слой, образованный в результате дислокации структуры. Касательное напряжение на стенке опалубки принимаем по формуле (6)

$$\tau = \tau_{0,пс}, \quad (6)$$

где $\tau_{0,пс}$ – начальное предельное напряжение сдвига бетонной смеси в пристенном слое.

Необходимо отметить, что при таком подходе касательное напряжение сдвига у стены опалубки имеет значение между 0 и $\tau_{0,пс}$, в зависимости от местной деформации сдвига смеси. Однако в случае бетонной смеси эта деформация сдвига может возникнуть, когда материал слегка уплотняется под своим собственным весом. В работе [9] показано, что экспериментальные замеры деформации сдвига у стенки опалубки составляют величину порядка 0,003. И этого достаточно для полной мобилизации напряжения сдвига, т.к. критическая деформация цементного геля имеет порядок 0,0001. Поэтому допущение, что предельное напряжение сдвига в пристенном слое полностью мобилизуется, является верным.

Дифференциальное уравнение равновесия элементарного объема смеси (см. рис. 1) имеет вид

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = \gamma_{св} - \tau_{0,пс} \cdot \frac{P}{S}, \quad (7)$$

где σ_x – вертикальное давление;

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

P – периметр опалубки;

S – площадь горизонтального сечения опалубки.

Решая дифференциальное уравнение при граничных условиях $x=0, \sigma_x=0$, находим

$$\sigma_x = (\gamma_{св} - \tau_{0,пс} \cdot \frac{P}{S}) \cdot x. \quad (8)$$

Для подвижных бетонных смесей, коэффициент бокового давления бетонной смеси (ξ_1) принимает вид

$$\xi_1 = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} = \tau g^2 (4S^2 - \frac{P}{2}). \quad (9)$$

Определение многих реологических параметров бетонной смеси в настоящее время все же затруднено из-за возникающих проблем реометрического характера и отсутствием общепринятых методик их измерения. Проблема измерения реологических параметров от времени твердения бетонной смеси и ее температуры еще более усугубляется. Поэтому в работе в дальнейшем мы оперируем с коэффициентом бокового давления бетонной смеси, который широко используется многими исследователями.

Коэффициент бокового давления или параметр Янсена, который используется для описания поведения зернистого материала в бункерных устройствах обусловлен коэффициентом Пуансона.

Используя выражения (8) и (9), находим формулы для определения бокового давления бетонной смеси для прямоугольной опалубки колонн

$$\sigma_p = \sigma_s = \xi_o \cdot \left[\gamma_{cu} - 2 \cdot \tau_{o,nc} \cdot \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{L} \right) \right] \cdot H. \quad (10)$$

Максимальное боковое давление бетонной смеси (σ_p^{max}) при одновременной безвибрационной укладке на всю высоту опалубки H определяют по следующим формулам:

- для прямоугольной опалубки

$$\sigma_p^{max} = \sigma_s = \xi_o \cdot \left[\gamma_{cu} - 2 \cdot \tau_{o,nc} \cdot \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{L} \right) \right] \cdot H; \quad (11)$$

- для квадратной опалубки колонн

$$\sigma_p^{max} = \xi_o \cdot \left(\gamma_{cu} - \frac{4 \cdot \tau_{o,nc}}{a} \right) \cdot H; \quad (12)$$

- для круглой опалубки колонн

$$\sigma_p^{max} = \xi_o \cdot \left(\gamma_{cu} - \frac{2 \cdot \tau_{o,nc}}{r} \right) \cdot H; \quad (13)$$

- для опалубки стены

$$\sigma_p^{max} = \xi_o \left(\gamma_{cu} - \frac{2 \cdot \tau_{o,nc}}{a} \right) H. \quad (14)$$

Формулы справедливы при одновременном бетонировании подвижных смесей на всю высоту опалубки без вибрации, что часто имеет место на практике и, особенно, при возведении колонн. Распределение бокового давления по высоте носит линейный характер, близкий к гидростатическому давлению.

Коэффициент ξ_o определяют экспериментально в начальный период твердения (укладки) бетонной смеси. Величину $\tau_{o,nc}$ также определяют экспериментально в этот же период времени для конкретного состава бетонной смеси и определенного вида лицевой поверхности опалубки.

При наличии в бетонной смеси вовлеченного воздуха она может сжиматься и повлиять на коэффициент ξ_o . В работе [9] было показано, что содержание воздуха (φ) в смеси оказывает влияние на коэффициент бокового давления

$$\xi_o = \frac{6 + \varphi}{6 + 10 \varphi}, \quad (15)$$

где φ – относительный объем вовлеченного воздуха в смеси.

При $\varphi = 0,02$ (2%) получаем $\xi_o = 0,971$, а при $\varphi = 0,04$ (4%) – $\xi_o = 0,945$. Поэтому при наличии вовлеченного воздуха в бетонной смеси давление на опалубку может быть на 5÷10% ниже гидростатического.

Введем понятие относительного бокового давления σ' – отношение бокового давления к гидростатическому давлению бетонной смеси. При одновременной укладке бетонной смеси на всю высоту опалубки относительное боковое давление в таком случае следующее:

- для прямоугольной опалубки

$$\sigma' = \frac{\sigma_p}{\gamma_{cu} \cdot H} = \xi_o \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot \tau_{o,nc}}{\gamma_{cu}} \cdot \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{L} \right) \right]; \quad (16)$$

– для квадратной опалубки колонн

$$\sigma' = \xi_{\sigma} \cdot \left(1 - \frac{4 \cdot \tau_{\text{отс}}}{\gamma_{\text{св}} \cdot a} \right); \quad (17)$$

– для круглой опалубки колонн

$$\sigma' = \xi_{\sigma} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot \tau_{\text{отс}}}{\gamma_{\text{св}} \cdot r} \right); \quad (18)$$

– для опалубки стены

$$\sigma' = \xi_{\sigma} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot \tau_{\text{отс}}}{\gamma_{\text{св}} \cdot a} \right). \quad (19)$$

Эти отношения могут объяснить экспериментальные наблюдения. Они действительно прогнозируют понижение бокового давления в опалубках с малым поперечным сечением (низкое значение a, r).

Заключение. Боковое давление высокоподвижных бетонных смесей на вертикальную опалубку стен и колонн при безвибрационной укладке зависит от реологических параметров бетонной смеси в начальный период и геометрических параметров опалубки. Распределение давления по высоте опалубки носит линейный характер, близкий к гидростатическому.

Список цитированных источников

1. Ertingshauen H. Über den Schalungsdruck von Frischbeton – Hannover: Technische Hochschule, 1965. – 98 s.
2. Specht, M. Der Frischbetondruck nach DIN 18218 – die Grundlagen und Wichtigsten Festlegungen // Bautechnik (58) – 1981 – № 8. – S. 215–291.
3. Gardner N I., Ho P T.-I. Lateral Pressure of Fresh Concrete // ACI Journal, Proceedings. – V 76, № 7, July – 1979. – P. 809–820.
4. ACI 347 R Guide to Formwork for Concrete // ACI Structural Journal / September – October – 1988. – p p. 530–562.
5. Harrison, T.A. Formwork pressures // Concrete – 17, № 5 – 1983 – P. 27–29.
6. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона – М., 1981 – 464 с.
7. Блещик, И.П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и пресс-вакуумбетона – Минск, 1977. – 232 с.
8. Шалимо, Т.Е., Тулупов, И.И., Марковский, М.Ф. Особенности трубопроводного транспорта бетонных смесей бетононасосами – Мн.: Наука и техника, 1989. – 175 с.
9. Ovarlez G., Roussel N. A Physical Model for the Prediction of Lateral Stress Exerted by Self-Compacting Concrete on Formwork // RILEM Materials and Structures – V 39, № 2. – 2000 – P. 269–279.

УДК 624.072

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛИГОНОВ ТБО НА ТЕРРИТОРИИ ПЕРМСКОГО КРАЯ ПУТЕМ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО РЕГЛАМЕНТИРОВАНИЯ

Максимова С.В., О.И. Ручкинова

Введение. Обеспечение экологической безопасности при проектировании, строительстве, эксплуатации и рекультивации полигонов твердых бытовых отходов (ТБО) является одной из актуальных экологических, экономических и социальных проблем любого населенного пункта.

В настоящее время одной из первоочередных задач краевой администрации, администраций муниципальных образований, органов ЖКХ, санитарно-эпидемиологического надзора является разработка отвечающих современным