

Г.Н. РЯЗАНОВА
А.Ю. ПРОКОПЬЕВА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ БОКОВОГО ДАВЛЕНИЯ ЛЕГКОБЕТОННОЙ СМЕСИ, УЛОЖЕННОЙ В ОПАЛУБКУ, ПО СУЩЕСТВУЮЩИМ МЕТОДИКАМ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УКЛАДКИ С ПОЗИЦИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

DETERMINATION OF LATERAL PRESSURE OF LIGHT CONCRETE MIX LAID IN THE FORMWORK ACCORDING WITH EXISTING TECHNIQUES AND INSTALLATION PROCESS MODELING FROM THE POSITION OF OPERATIONAL IMPACTS

Произведен анализ существующих российских и зарубежных методик по определению бокового давления легкобетонной смеси, уложенной в опалубку. Определена область применения этих методик и учитываемые ими технологические факторы. Исследованы процессы, связанные с укладкой легкобетонной смеси в опалубочную систему, с позиции возникающих при этом эксплуатационных воздействий. Выявлено, что давление на опалубку по этим методикам определяется в зависимости от скорости бетонирования конструкции. Установлено, что распределение бокового давления легкобетонной смеси по высоте опалубки подобно воздействию тяжёлого бетона и может быть принято по аналогии с эпюрами гидростатического давления, при этом необходимо приблизить свойства виброуплотняемой легкобетонной смеси к свойствам тяжелой жидкости с соответствующими значениями плотности. Разработана расчетная схема определения бокового давления в несъемной опалубке.

Ключевые слова: боковое давление, легкобетонная смесь, опалубка, гидростатическое давление, эпюра гидростатического давления, тяжёлая жидкость, плотность, эксплуатационные воздействия

The analysis of existing Russian and foreign methods for determination of lateral pressure of light concrete mix laid in the formwork, its scope and technological factors is proposed as well as the study of the processes associated with the laying of light concrete mixture in the formwork system from the position of the resulting operational impacts. The results reveal that the pressure on the formwork for these methods depends on speed of concreting of the structure, and the distribution of lateral pressure light concrete mixture according to the height of the formwork is similar to the effects of heavy concrete and may be made by analogy with the plots of hydrostatic pressure, it is necessary to bring the properties of light concrete mix that consolidate by vibration to the properties of the heavy liquids with the corresponding density values.

Keywords: lateral pressure, light concrete mixture, formwork, hydrostatic pressure, hydrostatic pressure plot, heavy liquid, density, operational impact

Боковое давление бетонной смеси на вертикальную поверхность опалубки является основополагающим параметром при выборе опалубочной системы [1–6]. Существует большое количество методик по исследованию бокового давления легкобетонной смеси на опалубку, которые с разных позиций определяют влияние бокового давления с использованием различных критериев воздействия, при этом общепризнанные методики по данному вопросу отсутствуют. В основном давление на опалубку по существующим методикам определяется в зависимости от скорости бетонирования конструкции.

В настоящее время за рубежом и в России применяют следующие методики.

В Германии используют методику DIN 18218, которая определяет максимальное давление бетонной смеси на опалубку как гидростатическое. Опре-

деление давления бетона по диаграммам DIN 18218 действительно в довольно узких условиях [7]:

- объёмный вес бетонной смеси 25 кН/м^3 ;
- конец схватывания бетона через 5 ч;
- температура свежего бетона $+15^\circ \text{C}$;
- уплотнение глубинными вибраторами;
- плотная опалубка.

Методика CIRIA-REPORT 108 (Великобритания) имеет область применения независимо от консистенции, при этом $5^\circ \text{C} < T < 30^\circ \text{C}$ [7]. Для коэффициента добавок $C_2 < 1,0$ значение коэффициента температуры $K_t < 1,0$ (без ограничений для снижения давления бетона при использовании бетонных наполнителей и температуры свежего бетона $+15^\circ \text{C}$). Тогда $P_{\max} < 90 \text{ кН/м}^2$ для стен. Кроме того, данная методика может применяться независимо от высоты бетонирования.

Расчёты по методике CIB-FIB-CEB (Франция) [7] учитывают следующие факторы влияния:

- высоту бетонирования;
- толщину стен d (в мм);
- вертикальную скорость свежеприготовленной бетонной смеси;
- величину осадки (в мм) по норме Р18-305;
- температуру свежеприготовленной бетонной смеси.

В методике АСІ 347R (США) для расчёта давления свежеприготовленной бетонной смеси различают формы поперечного сечения и диапазоны скорости бетонирования. При этом учитываются:

- форма поперечного сечения;
- вертикальная скорость;
- температура свежеприготовленной бетонной смеси;
- высота бетонирования.

В качестве предельных значений давления для стен установлены следующие:

$$P_{\min} = 28,74 \text{ кН/м}^2;$$

$$P_{\max} = 95,8 \text{ кН/м}^2 \text{ или } P_{\max} = 93,5 \cdot h \text{ кН/м}^2.$$

За основу принимается меньшее значение.

В России до выхода в свет СНиП III-15-76 зависимость по определению бокового давления бетонной смеси имела вид:

- при уплотнении бетонной смеси глубинными вибраторами:

$$P = \gamma \cdot h \text{ при } h < R, V < 0,75 \text{ м/ч};$$

$$P_{\max} = \gamma \cdot (0,27V + 0,78) \cdot K_1 \cdot K_2 \text{ при } h > 1 \text{ м}, V > 0,5 \text{ м/ч}, \quad (1)$$

где γ – плотность бетонной смеси, кг/м³; h – высота свежеслоя бетонной смеси, оказывающего давление на опалубку, м; R – радиус действия глубинного вибратора, м; K_1 – коэффициент, учитывающий подвижность бетонной смеси (принимается равным 0,8 для жесткой и малоподвижной смеси с осадкой конуса 0–2 см; 1 – для смесей с осадкой конуса 4–6 см; 1,2 – для смесей с осадкой конуса 8–12 см); K_2 – коэффициент, зависящий от температуры укладываемой бетонной смеси (принимается равным 1,15 для смесей с температурой 5–7 °С; 1 – для смесей

с температурой 12–17 °С; 0,85 – для смесей с температурой 28–32 °С; для промежуточных температур значения коэффициента K_2 следует принимать по большей величине);

- при уплотнении бетонной смеси наружными вибраторами:

$$P = \gamma \cdot h \text{ при } h < 2R_1, V < 4,5 \text{ м/ч};$$

$$P_{\max} = \gamma \cdot (0,27V + 0,78) \cdot K_1 \cdot K_2 \text{ при } h > 2 \text{ м}, V > 4,5 \text{ м/ч}, \quad (2)$$

где R_1 – радиус действия наружного вибратора, м.

Во всех случаях давление бетонной смеси рекомендуется ограничивать гидростатическим давлением, приближая свойства виброуплотняемой бетонной смеси к свойствам тяжелой жидкости с соответствующими значениями плотности.

Распределение бокового давления по высоте опалубки может быть принято по аналогии с эпюрами гидростатического давления, которые приведены на рис. 1. Такая эпюра удобна для расчётов, хотя даёт несколько завышенные значения $P_{\max}$. Результирующая нагрузка равна площади треугольной эпюры и рассчитывается по формуле

$$P_n = \frac{\gamma \cdot P^2}{2}. \quad (3)$$

Фактическое распределение бокового давления определяется в нижней части эпюры криволинейным участком (рис. 1, а). Высота $h_{\max}$ (рис. 1, в), на которой боковое давление имеет наибольшее значение, зависит от скорости бетонирования и быстроты схватывания бетона. Для бетонов на ординарных цементах (портландцемент, шлакопортландцемент и др.) значение $h_{\max} = \frac{2}{3} H$, а $P = (0,4-0,5) P_{\max}$. Для удобства использования в практических расчётах такая эпюра заменяется трапециевидной соответствующей площади.

При невысоких скоростях бетонирования в нижней части несъёмной опалубки появляются силы сцепления с бетоном конструкции, которые направлены противоположно боковому давлению. С учётом сцепления в нижней части опалубки эпюра бокового давления приобретает вид, показанный на рис. 2.

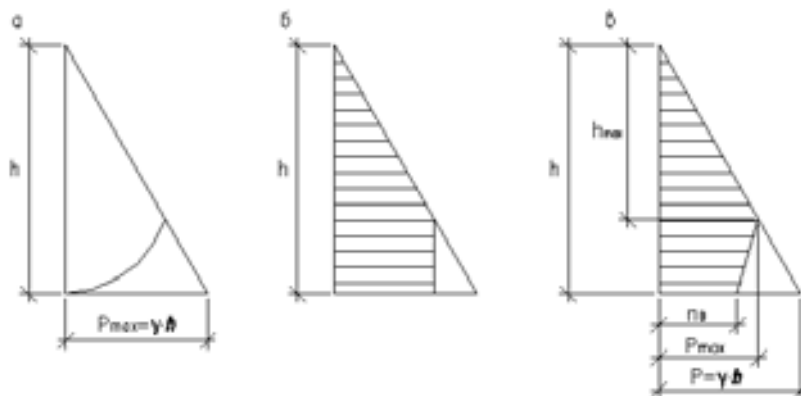


Рис. 1. Распределение давления бетонной смеси по высоте опалубки:
а – эпюра давления теоретическая; б – то же упрощенная расчётная; в – то же треугольная расчётная

При этом горизонтальная нагрузка равна 0, если сцепление равно боковому давлению $P_{бок}$.

Кроме бокового давления бетонной смеси (статической составляющей нагрузки), необходимо учитывать:

- динамические воздействия на опалубку от сбрасывания смеси $P_{дин}$;
- нагрузки от вибрирования бетонной смеси $P_{виб}$.

В табл. 1 приведена зависимость горизонтальных динамических нагрузок на вертикальную опалубку от способа подачи бетонной смеси.

Расчётную горизонтальную нагрузку следует определять по формуле

$$P_p^n = \sum_{i=0}^n P_{H_i}^e \cdot K_i,$$

(4)

где $P_{H_i}^e$ – нормативная (i-я горизонтальная нагрузка, Па); K_i – коэффициент перегрузки, значения которого приведены в табл. 2.

Действующий в настоящее время СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции» регламентирует нагрузки для расчётов опалубок монолитных конструкций как для наружного, так и для внутреннего вибрационного способа уплотнения. Расчётной формулой для определения

максимального бокового давления возможно пользоваться только в узком диапазоне бетонных смесей, в частности СП не оговаривает расчёт нагрузок на опалубку от лёгкой бетонной смеси. В целях упрощения расчётов в последней редакции СП распределение бокового давления бетонной смеси по высоте принято по аналогии с гидростатическим давлением – по треугольной эпюре, без учёта сил трения бетонной смеси об опалубку и толщины бетонируемой конструкции, а также других технологических факторов [8,9].

Б.Г. Гусев [10], И.С. Файвусович, анализируя опытные данные, доказывают, что необходимо применять уравнения Флорина-Био. Как известно, указанная теория основана на следующих предпосылках: поровая жидкость – сжимаемая, минеральная часть твердой фазы вместе с водно-коллоидными связями (скелетом) подчиняется уравнениям линейной упругости. Объёмные изменения такой среды пропорциональны среднему давлению, а деформации сдвига – сдвигающим напряжениям. Взаимодействие фаз представлено воздействием поровой жидкости на скелет в виде объёмных или массовых сил. Закономерность изменения соотношения фаз

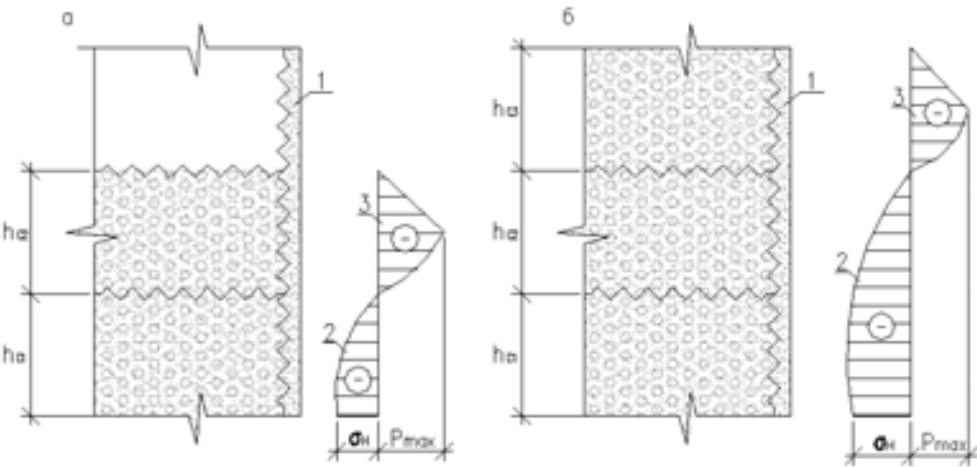


Рис. 2. Боковое давление бетонной смеси с учётом сцепления бетона с опалубкой:
а – при двухслойном варианте бетонирования; б – при трёхслойном варианте бетонирования

Таблица 1

Динамические нагрузки на вертикальную опалубку

Способ подачи	Нагрузка, Па
Спуск по лоткам и хоботам, а также подача непосредственно из бетонопроводов	4000
Выгрузка из бадей объёмом 0,2-0,8 м³	4000
Выгрузка из бадей объёмом 0,8 м³	6000

Таблица 2

Значения коэффициента перегрузки

Нагрузка	Коэффициент перегрузки
Ветровая	1,2
От бокового давления бетонной смеси и от сотрясений при выгрузке бетонной смеси	1,3

в единице объёма определяется, как в теории Терцаги-Герсеванова [11,12], законом фильтрации воды через пористый скелет и условиями неразрывности твердой и жидкой фаз. Приходят к выводу, что при укладке бетона литевой консистенции слоями равной толщины и интервалом времени, пренебрегая изменениями давления по координатам и учитывая только изменение давления по времени, возможно применить метод суммирования.

В.М. Сивко отмечает [13], что коэффициент бокового распора растёт с увеличением плотности бетонной смеси и равен 0,2–0,5. Величина коэффициента не зависит от колебаний рабочего органа вибратора. Коэффициент возрастает при увеличении В/Ц отношения, например, для В/Ц=0,42 коэффициент $k=0,8-1$, т.е. смесь приближается к гидростатической среде. Осевые напряжения по ширине изделия выражены параболой, максимальной в середине формы, у стенок несколько меньше, что автор объясняет влиянием трения смеси о стенки опалубки.

В общем случае по своему строению и концентрации дисперсной фазы бетонной смеси идентичны, по мнению Н.П. Блещика [14], связным, особенно водонасыщенным малопрочным грунтам. Поэтому логично рассмотреть используемые в механике грунтов методы оценки физико-механических свойств и уравнения состояния при сдвиге с точки зрения применения их к бетонным смесям.

Понятие о двух видах давления в грунтах – в скелете и воде – предложено Терцаги [13] в 1925 г. и описывается уравнением

$$P = P_{gr} + P_w \quad (5)$$

где P – общее давление в пределах рассматриваемого сечения; P_{gr} , P_w – давление, воспринимаемое соответственно скелетом грунта и водой.

Н.П. Блещик [14] считает, что в первый момент давление воспринимается только водой, находящейся в порах, при этом появляется дополнительный, по сравнению с гидростатическим, напор, который принимают за дополнительное давление поровой воды и называют поровым давлением. Таким образом, была сформулирована теория порового давления, согласно которой давление в скелете грунта – эффективное, давление в воде – поровое (или нейтральное), а их сумма – тотальное давление. По мнению автора, напряжённое состояние во время разрушения грунта, а также возможность изменения его объёма зависят только от эффективных напряжений.

При проведении экспериментов по определению бокового давления бетонной смеси было замечено, что фактическое значение давления бетонной смеси несколько ниже расчётного [11,12]. Характер изменения давления менялся в зависимости от применяемых материалов опалубки, как показано на рис. 3.

Уменьшение давления бетонной смеси на опалубку авторы объясняют влиянием сил трения, возникающих между опалубкой и бетонной смесью, и образованием в связи с небольшой толщиной стены сводов в бетонной смеси. В результате значительная часть нагрузки от бетонной смеси передаётся на опалубку как вертикальная составляющая.

К аналогичному выводу приходит С.М. Анпилов [7] и предлагает помимо горизонтальной нагрузки на опалубку рассчитывать вертикальную нагрузку, используя зависимость

$$H_v = N_r \cdot H_z \cdot L_z \cdot K_m \quad (6)$$

где N_r – средняя динамическая или статическая нагрузка, действующая на элемент опалубки, H_z – высота опалубки, m ; L_z – длина палубы опалубки, m ;

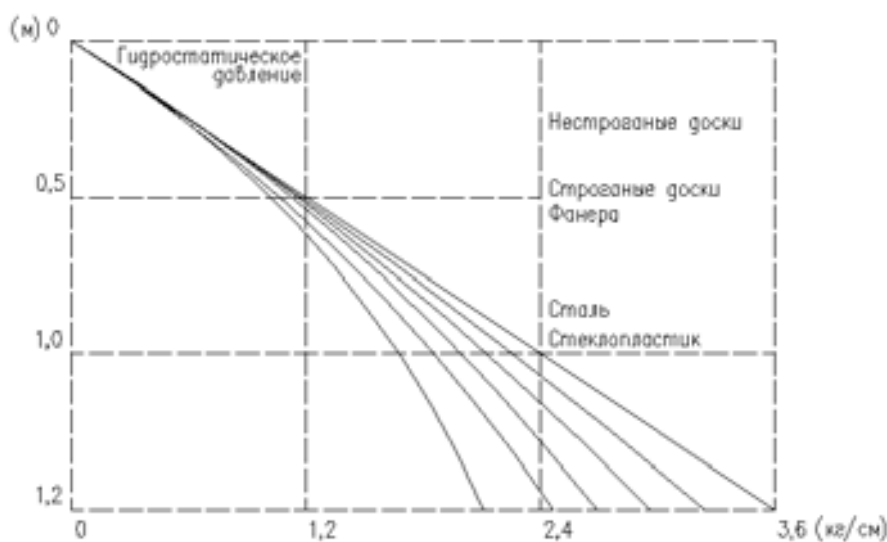


Рис. 3. Характер изменения давления бетонной смеси в зависимости от материала опалубок (по данным И.Г. Совалова, В.Д. Топчий [15])

K_m – коэффициент трения бетонной смеси о воспринимающую поверхность опалубки.

Американский институт бетона на основе 350 проведенных опытов предлагает величину бокового давления бетонной литевой консистенции рассчитывать по зависимости

$$P=W \cdot h, \quad (7)$$

где P – боковое давление бетонной смеси; W – удельная масса бетона; h – высота слоя жидкости или бетонной массы.

Анализ технологических факторов, влияющих на величину бокового давления, исследуется во всех вышеперечисленных методиках.

Основными факторами, влияющими на величину бокового давления бетонной смеси на опалубку, А.А. Афанасьев [16] считает:

- плотность бетона, толщину слоя, укладываемого за один приём;
- структурно-технологические свойства бетона (подвижность, коэффициент раздвижки зёрен крупного заполнителя, плотность заполнителя, водопотребность и водоотдача, сроки схватывания и качество цемента, температурно-влажностный режим твердения);
- способ уплотнения бетона, режим виброуплотнения бетона (A ; W – амплитуда и частота вибровоздействия), параметры давления при вибронагнетании;

- положение вибромеханизма относительно опалубочной системы (глубинное, поверхностное, навесное положение вибратора);

- режим загрузки смеси (мелкими порциями, непрерывно, послойно или большими порциями локально), силы трения между опалубкой и свежим бетоном.

При разработке DIN 18218 восемнадцать факторов, влияющих на боковое давление бетонной смеси, были классифицированы по степени важности в три группы:

1 – скорость бетонирования, объёмный вес бетона, вид уплотнения, толщина вибрируемого слоя, консистенция бетонной смеси, температура свежего бетона;

2 – время твердения, добавки к бетону, поровое давление, продолжительность вибрации, конструкция опалубки и её жёсткость;

3 – способ укладки бетона, вид и крупность заполнителя, вид и количество цемента, толщина слоя бетонирования, насыщенность конструкции арматурой.

Моделирование эксплуатационных воздействий легковесной смеси в процессе укладки в опалубку может быть осуществлено расчётно-экспериментальным путём [17]. Для этого предлагается следующая расчётная схема определения бокового давления, представленная на рис. 4.

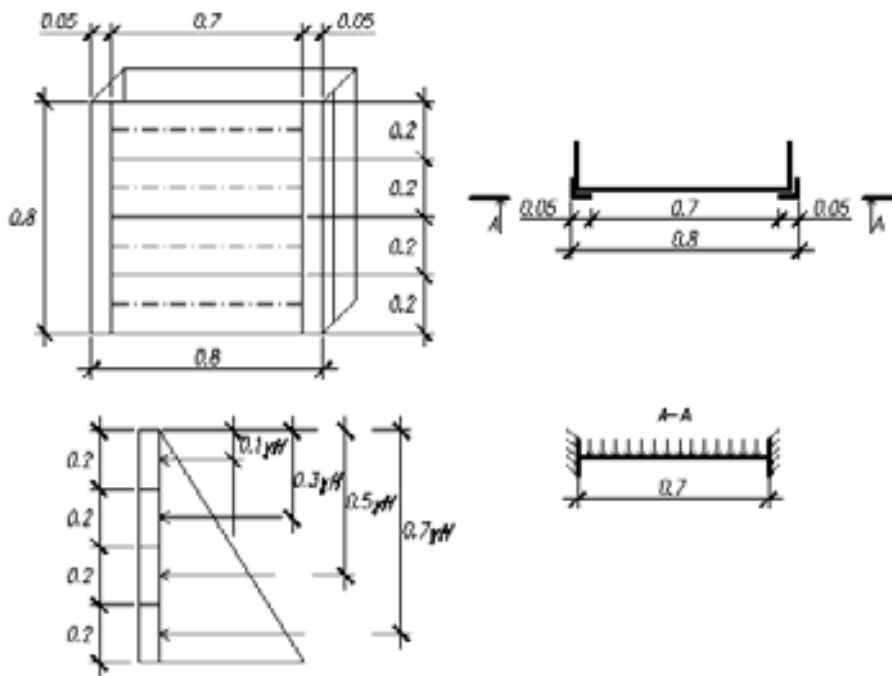


Рис. 4. Расчётная схема определения бокового давления в несъёмной опалубке

Вывод. В результате экспериментальных исследований и моделирования условий эксплуатации можно получить значение воздействия послой-

но уложенной легковесной смеси определённого состава на стенки опалубки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шугуан Х., Чжоу В. Легкие бетоны. М.: АСВ, 2016. 304 с.
2. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Основы бетоноведения. СПб.: Строй-Бетон, 2006. 696 с.
3. Пьюрифой Р. Опалубка для бетонных конструкций: пер. с англ. М.: Стройиздат, 1981. 211 с.
4. Баженов Ю.М., Король Е.А., Ерофеев В.Т., Митина Е.А. Ограждающие конструкции с использованием бетонов низкой теплопроводности. Основы теории, методы расчета и технологическое проектирование. М.: АСВ, 2008. 320 с.
5. Рязанова Г.Н., Камбург В.Г., Ткаченко А.Н. Модельные представления технологии возведения ограждающих конструкций в несъемной опалубке с заполнением крупнопористым керамзитобетоном // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2008. №2. С. 79–85.
6. Шмит О.И. Опалубка для монтажного бетона / пер. с нем. Л.М. Айторн; под ред. Н.И. Евдокимова. М.: Стройиздат, 1987. 87 с.
7. Анпилов С.М. Опалубочные системы для монолитного строительства. М.: АВС, 2005. 280 с.
8. Ярмаковский В.Н., Семченков А.С. Конструкционные легкие бетоны новых модификаций в ресурсоэнергосберегающих строительных системах зданий // Academia. Архитектура и строительство. 2010. №3. С. 31–39.
9. Петров В.П., Макридин Н.И., Ярмаковский В.Н. Пористые заполнители и легкие бетоны. Материаловедение. Технология производства: учебное пособие / СамГАСУ. Самара, 2009. 436 с.
10. Гусев Б.В., Файбусович А.С. Технологическая механика вибрируемых бетонных смесей. М.: Научный мир, 2002. 250 с.
11. Терцаги Карл. Теория механики грунтов / пер. с нем. И.С. Утевский; под общ. ред. Н.А. Цитовича. М.: Госстройиздат, 1961. 250 с.
12. Герсванов Н.М. Исследования в области динамики грунтовой массы, механики и прикладной математики // Собрание сочинений: в 2 т. М.: Стройиздат, 1948. 373 с.
13. Сивко В.И. Основы механики вибрируемой бетонной смеси. Киев, 1987. 167 с.
14. Блещик Н.П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси. Минск: Наука и техника, 1977. 232 с.
15. Совалов И.Г., Топчий В.Д. Опалубочные работы. М.: Стройиздат, 1971. 192 с.
16. Афанасьев А.А. Возведение зданий и сооружений из монолитного железобетона. М.: Стройиздат, 1990. 380 с.
17. Рязанова Г.Н., Камбург В.Г., Баранова Т.И., Ткаченко А.Н. Технология и моделирование процесса возведения ограждающих конструкций из крупнопористого керамзитобетона в несъемной опалубке // Academia. Архитектура и строительство. 2008. №2. С. 71–76.
18. Рязанова Г.Н., Камбург В.Г. Совершенствование технологического моделирования теплоэффективных ограждающих конструкций в несъемной опалубке // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2008. Т.1. С. 429–430.
19. Рязанова Г.Н., Камбург В.Г. Моделирование технологии возведения самонесущих конструкций из крупнопористого керамзитобетона в несъемной опалубке из цементно-стружечных плит // Региональная архитектура и строительство. 2009. №1. С. 74–78.
20. Рязанова Г.Н., Камбург В.Г. Совершенствование технологии возведения ограждающих конструкций в несъемной опалубке: монография. Пенза: ПГУАС, 2010. 105 с.
21. Панфилов Д.А. Экспериментальные исследования прогибов изгибаемых железобетонных элементов, изготовленных из обычных и высокопрочных бетонов // Бетон и железобетон. 2011. №6. С.8.

Об авторах:

РЯЗАНОВА Галина Николаевна

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и организации строительного производства Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194 E-mail: ryzanovagn55@mail.ru

ПРОКОПЬЕВА Анастасия Юрьевна

магистрант 2-го года обучения кафедры технологии и организации строительного производства Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194 E-mail: lady.schinckareowa2010@yandex.ru

RYAZANOVA Galina N.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Technology and Organization of Construction Operations Chair Samara State Technical University Academy of Civil Engineering and Architecture 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194 E-mail: ryzanovagn55@mail.ru

PROKOPYEVA Anastasia Yu.

Master's Degree Student of the Industrial and Civil Engineering Faculty Samara State Technical University Academy of Civil Engineering and Architecture 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194 E-mail: lady.schinckareowa2010@yandex.ru

Для цитирования: Рязанова Г.Н., Прокопьева А.Ю. Определение бокового давления легкого бетонной смеси, уложенной в опалубку, по существующим методикам. Моделирование процесса укладки с позиции эксплуатационных воздействий // Градостроительство и архитектура. 2017. Т.7, №4. С. 14–19. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.04.3.
For citation: Ryzanova G.N., Prokopyeva A.Yu. Determination of lateral pressure of light concrete mix laid in the formwork according with existing techniques and installation process modeling from the position of operational impacts // Urban construction and architecture. 2017. V.7, 4. Pp. 14–19. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.04.3.