

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

<i>А. Харитонов.</i> Структурный подход в численном моделировании собственных деформаций конгломератных структур.....	2
<i>М. Кирсанов, С. Астахов.</i> Математическая модель свода покрытия промышленного объекта.....	8
<i>Ю. Котиков.</i> Оценка энергоэффективности транспорта по критерию L6T-4 Бартини.....	17
<i>В. Кузьмичев, В. Верстов.</i> Чашечные смесители с виброактиватором в технологии строительного производства.....	23
<i>Д. Уразгильдеев, Г. Белый.</i> О расчете на устойчивость стержневых элементов сплошностенчатых арок по изгибо-крутильной форме.....	31
<i>А. Юдина, Р. Оганян.</i> Технология зимнего бетонирования монолитных конструкций с применением греющего провода.....	38

## СТРУКТУРНЫЙ ПОДХОД В ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ СОБСТВЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ КОНГЛОМЕРАТНЫХ СТРУКТУР

Алексей Харитонов

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-ая Красноармейская ул., д.4

peepdv@mail.ru

### Аннотация

В работе сформулированы принципы структурно-имитационного моделирования свойств конгломератных материалов на примере цементных композиций, основная сущность которых заключается в создании на основе данных о структуре материала иерархически выстроенных моделей отдельных структурных уровней (включая субмикроструктурный). Параметры свойств, определенные для моделей предыдущего структурного уровня, используются в качестве исходных данных континуальной среды, являющейся матричной составляющей модели последующего уровня. Подобное построение общей модели композиции позволяет напрямую увязать структурные особенности на уровне нанометра с макросвойствами материала. На основе метода конечных элементов, путем определения соответствующих внешних и внутренних нагрузок, реализованы алгоритмы, воспроизводящие физико-механические процессы и явления, характерные для отдельных свойств цементных систем (влажностная усадка, деформации под нагрузкой). Использование метода конечных элементов позволяет максимально полно соблюсти геометрическую и физическую «реалистичность» модели, отражающей особенности исследуемой структуры, что дает возможность с высокой степенью достоверности решать научно-практические задачи по установлению количественного влияния дискретных параметров структуры на различные свойства материала.

### Ключевые слова

Бетон, влажностная усадка, имитационное моделирование, метод конечных элементов.

### Введение

Как известно, свойства конгломератных материалов напрямую связаны с их структурой, при этом создание материала с требуемым уровнем величин отдельных характеристик диктует свои, зачастую противоречивые (по отношению к другим свойствам) требования к параметрам структуры. В связи с этим возникает задача получения систем с заданными свойствами, показатели которых удовлетворяли бы определенному комплексу условий эксплуатации.

Решение указанной задачи затрудняется тем, что изучение свойств конгломератных систем (например, бетонов или грунтов) в основном базируется на использовании эмпирических методов, которые не всегда позволяют установить количественную взаимосвязь между дискретными параметрами структуры и различными свойствами материала. Эксперименты, как правило, дают интегральную оценку влияния структуры на исследуемое свойство.

Требуемая математически выраженная взаимосвязь может быть получена на основе имитационного компьютерного моделирования, подразумевающего создание расчетных моделей структуры композиционных материалов (Bentz, 2011; Buffo-Lacarrière et al., 2007). Имитация физико-механических процессов и явлений возможна путем реализации вычислительных процедур различных методов, в том числе метода конечных элементов.

Данная работа посвящена методологическим принципам прогнозирования и управления свойствами цементных конгломератных материалов на основе структурно-имитационного моделирования, заключающегося в представлении распределения в объеме, взаимной ориентации и сопряжения отдельных компонентов структуры, а также их совместной работы на различных уровнях с применением численных методов.

## Методы

В данной работе процесс моделирования базируется на представлении компонентов структуры в двухмерном (плоском) виде. Однако и при таком подходе требуется поиск компромисса между желанием максимально реального отражения формы компонентов, нюансов структуры и возможностями вычислительной техники. Тем не менее, двухмерная постановка задачи позволяет исследовать процессы возникновения внутренних напряжений в условиях воздействия различных внутренних и внешних факторов с учетом стохастического характера взаимной координации компонентов структуры и их связей.

На первом этапе, устанавливаются характерные структурные уровни материала, определяются физико-механические параметры компонентов отдельных структурных уровней. Далее, с учетом используемого математического аппарата и возможностей вычислительной техники, формируются геометрические модели структуры различного масштабного приближения с учетом вероятностного характера взаиморасположения компонентов структуры.

Следующим шагом создания численных моделей является реализация процедур метода конечных элементов, позволяющих представить модель как единую систему, состоящую из компонентов, обладающими различными физико-механическими параметрами (модулем упругости, коэффициентом Пуассона и др.). Для каждой модели определяются общие характеристики упругости, которые используются в качестве параметров сплошной среды (матрицы) в модели последующего масштабного приближения.

Создание численной модели материала наиболее крупного масштабного уровня соответствует завершению первого этапа моделирования. Адекватность разработанных моделей структурных уровней проверяется путем сопоставления расчетных параметров с результатами экспериментов.

Второй этап моделирования связан с исследованием конкретных характеристик рассматриваемых цементных систем – разработкой алгоритмов воспроизведения свойств материала, базирующихся на общепринятых теориях и положениях. С точки зрения имитационного моделирования эти алгоритмы связаны с определением нагрузок (внешних или внутренних), действующих в моделях различных структурных уровней и масштабных приближений, оценкой результатов действия этих нагрузок и, при необходимости, преобразованием исходных моделей. В качестве конечного результата рассматривается интегральный отклик на воздействие, соответствующее исследуемому свойству.

## Результаты исследования

Применительно к цементным бетонам наиболее рациональным, на наш взгляд, видится разработка имитационных моделей структуры на основе данных экспериментальных исследований сформированного (28-суточного) цементного камня. При этом упускается кинетический аспект формирования структуры, но исключаются неоднозначность моделирования процессов гидратации.

Основным препятствием для объяснения взаимосвязи структуры и свойств цементных систем является большой диапазон масштабов структурных уровней.

Первым этапом подобного моделирования явилась разработка наноструктурной модели цементного камня (Kharitonov, 2007), соответствующей фазе C-S-H. Данная модель базируется на результатах физико-химических исследований цементного камня 28-суточного возраста с учетом различных технологических факторов (условия твердения, В/Ц, присутствие химических добавок). Основными параметрами явились общая пористость и распределение нанопор по размеру. Экспериментальное определение параметров пористости осуществлялось по методикам, основанным на протонном магнитном резонансе (ПМР), десорбции бензола и ртутной порометрии.

Распределения пор геля по размеру, определенное при помощи ПМР показало, что вне зависимости от технологических факторов значительный объем порового пространства цементного камня представлен порами радиусом порядка 0,85 нм. Исследованные факторы оказывают влияние на объем данных пор через изменение степени гидратации цемента. Однако с качественной стороны, строение C-S-H (по параметрам пористости) остается неизменным. Общий объем пор указанного размера в среднем составляет порядка 18% объема цементного камня и 65% объема всех пор.

Наличие пор радиусом 0,85 нм пор указывает на то, что размер единичных элементов структуры геля составляет порядка 4-5 нм. Аналогичная оценка размеров твердой фазы геля получена методами малоуглового нейтронного рассеяния (Jennings, et al., 2007).

Исследование пористости цементного камня методами адсорбции бензола и ртутной порометрии позволило выявить наличие большого объема пор радиусом 3-5 нм. В свою очередь это подтверждает предположение об агрегации единичных элементов геля: кластеры размером 40-50 нм обеспечивают формирование пор указанного радиуса, что согласуется с экспериментальными данными (Tennis and Jennings, 2000).

Относительно пор большего размера (5-10 нм) однозначной картины нет. Тем не менее, можно выделить общие для всех исследованных составов диапазоны размеров пор: 7-10 нм, 12-16 нм, 21-26 нм, 41-44 нм, 70-73

нм. Причем объем подобных пор определяется технологическими факторами. Данные факторы могут быть учтены при разработке модели структуры для различных частных случаев.

На основании вышеизложенного нами разработана плоская трехуровневая численная модель наноструктуры, применительно к цементному камню нормально-влажностного твердения (рисунок 1). Модель первого уровня реализует представление о структуре геля, как коллоидной системе, состоящей из отдельных частиц диаметром 4,4 нм, обеспечивающих превалирующее количество пор радиусом около 0,85 нм (рисунок 1а). При этом, не исключается слоистый характер внутреннего строения отдельных частиц, но данное обстоятельство в расчетах не учитывается из-за чрезвычайно малого межслоевого пространства. Количество пор радиусом 0,85 нм определяется их удельной поверхностью, исходя из чего пористость модели составила 24%.

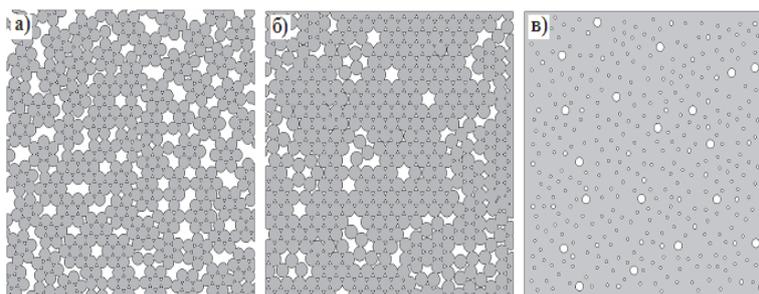


Рисунок 1. Геометрическая модель наноструктуры цементного камня  
Размеры моделей: а) 200×200 нм; б) 800×800 нм; в) 5×5 мкм

Модель структуры второго уровня (рисунок 2б) построена, исходя из положений о фрактальном строении цементного геля, т.е. также представляет собой совокупность отдельных частиц твердой фазы, но диаметром 40 нм. Данная модель охватывает диапазон пор от 5 до 30 нм.

В качестве структурных элементов модели третьего уровня (рисунок 2в) рассматриваются поры радиусом в диапазоне от 30 до 80 нм, распределенных в матрице (гидросиликатном геле).

Для реализации принципа стохастического распределения структурных элементов в создаваемых имитационных моделях, нами разработана программа «*PoreSolution*», реализующая метод Монте-Карло (Kharitonov, 2008).

При переходе к микроструктурному уровню, включающем кристаллогидратные соединения, в качестве структурных элементов нами принимались во внимание только фазы портландита, этtringита, а также негидратированного клинкера как наиболее представительные в цементном камне и в наибольшей степени оказывающие влияние на механические свойства материала. Подобное допущение было сделано ввиду необходимости ограничения существующего многообразия кристаллических фаз в реальной системе. Содержание портландита (~20%) и этtringита (~10%) в моделируемом цементном камне определялось методами количественного рентгенофазового и термографического анализов.

На рисунке 2 представлена микроструктурная модель цементного камня ( $V/C=0,28$ ), состоящая из трех разномасштабных приближений.

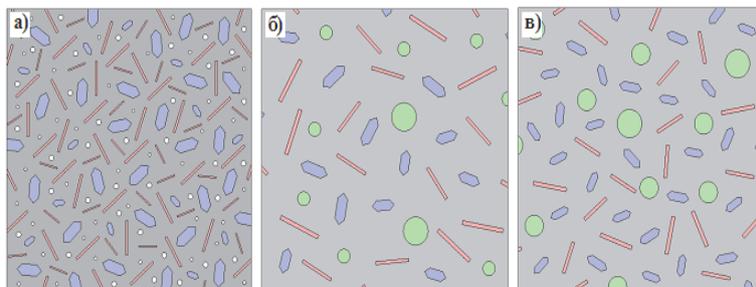


Рисунок 2. Микроструктурная модель цементного камня  
Размеры моделей: а) 50×50 мкм; б) 100×100 мкм; в) 200×200 мкм  
игловидные элементы – этtringит, шестиугольные элементы – портландит, окружности – клинкер и поры (белого цвета)

В модели мезоуровня (рисунок 4) представлены четыре характерные фазы: матрица (цементный камень), зерна песка, контактная зона толщиной 20 мкм и условно-замкнутые поры. Распределение условно-замкнутых пор в реальном мелкозернистом бетоне определялось стереометрическими методами. Содержание зерен песка составляет 48%, что примерно соответствует отношению масс цемента и песка в бетоне равном 1:2,5.

Одним из этапов создания расчетных моделей на каждом из рассмотренных масштабных уровней являлось представление структуры в виде совокупности конечных элементов, присвоение физических свойств каждому структурному элементу, задание условий закрепления, приложение нагрузки – т.е. реализация алгоритма метода конечных элементов. Эта часть создания расчетной модели связана с использованием программного комплекса ANSYS.

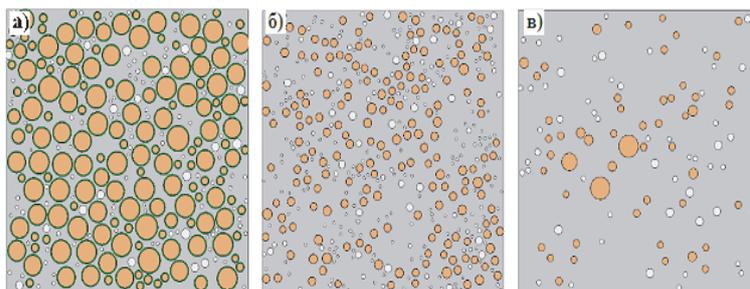


Рисунок 3. Модель мезоуровня бетона  
Размеры моделей: а) 5×5 мм; б) 25×25 мм; в) 50×50 мм

При назначении свойств моделей (модуля упругости и коэффициента Пуассона) учитывалось, что внутреннее строение матрицы модели более низкого масштабного уровня является отражением модели высокого уровня. Следовательно, физические свойства матрицы последующего уровня наследуют свойства всей системы предыдущего уровня. В таблице представлены рассчитанные физико-механические свойства дискретных уровней модели.

Таблица 1. Физико-механические характеристики дискретных моделей

Уровень моделирования		Пористость, %		Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
		общая	модели		
нано-	а	24,0	24,0	35,1	0,38
	б	36,0	15,8	15,0	0,30
	в	39,2	5,0	13,1	0,29
микро-	а	34,4	1,5	14,2	0,29
	б	30,9	0	15,4	0,29
	в	26,7	0	17,3	0,29
мезо-	а	18,0	3,4	21,3	0,28
	б	19,4	4,4	22,0	0,27
	в	20,3	2,4	21,1	0,27

Примечание: общая пористость рассчитана с учетом пористости предыдущих моделей

Модуль упругости ( $E$ ) и коэффициент Пуассона ( $\mu$ ) кристаллических фаз приняты на основании литературных данных (Haescker et al., 2005) и составляют для единичных структурных элементов в модели С-С-Н (рисунок 1а)  $E=84,5$  ГПа,  $\mu=0,45$ , для портландита  $E=42,3$  ГПа,  $\mu=0,324$ , для эттрингита  $E=25,0$  ГПа,  $\mu=0,25$ , для клинкера  $E=117,6$  ГПа,  $\mu=0,314$ , кварцевого песка –  $E=72,8$  ГПа,  $\mu=0,167$ .

Применительно к данным моделям нами сформулированы и реализованы вычислительные методы, моделирующие механизмы влажностной усадки. Данные механизмы основаны на принципах термодинамического равновесия системы с окружающей средой и подразумевают в качестве основных факторов, определяющих величину усадочных деформаций, капиллярное давление и изменение свободной поверхностной энергии [13].

Методика расчета заключается в определении максимального радиуса пор, заполненных водой, и капиллярного давления в них при соответствующем значении относительной влажности среды. Полученные значения капиллярного давления реализуются в компьютерной модели структуры в виде внешней нагрузки, прикладываемой к граням конечных элементов, лежащих по поверхностям пор. Далее вычисляются значения изменения поверхностной энергии и деформации, обусловленные ее действием. Расчеты производятся по известной величине удельной поверхности осушаемых пор. Полученные деформации от поверхностной энергии задаются матрице модели структуры. Дополнительно к деформациям при каждом расчетном уровне влажности, определенным для дискретной модели, добавляются деформации модели предшествующего уровня.

Для сопоставления расчетных и экспериментальных данных использовалось дифференцированное представление зависимости усадки от относительной влажности (рисунок 4). Сравнение расчетных и экспериментальных усадочных деформаций свидетельствует об адекватности предложенной модели структуры цементного камня и алгоритма расчета усадки: в обоих случаях присутствуют характерные пики деформаций усадки. Хорошо согласуются и абсолютные величины расчетной и экспериментальной усадки (рисунок 5), а также согласуются с результатами других авторов (Pucharenko et al., 2013; Smirnova, 2012).

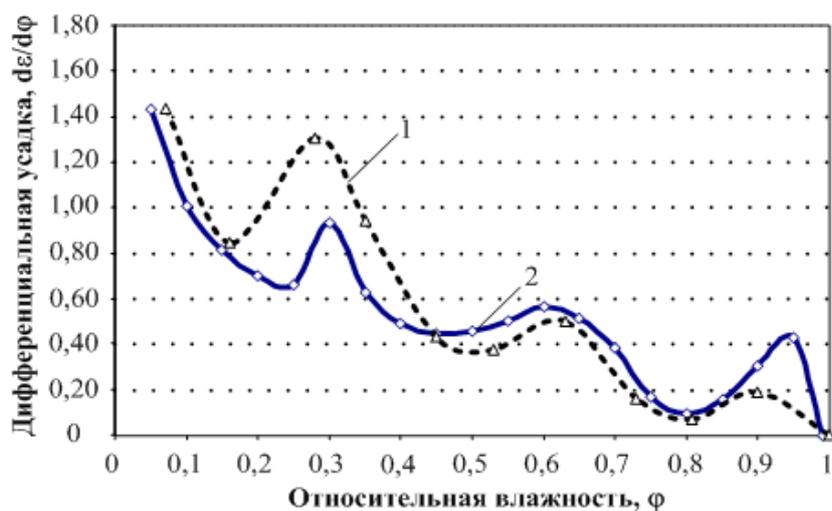


Рисунок 4. Дифференциальная усадка:  
1 – эксперимент; 2 – расчет

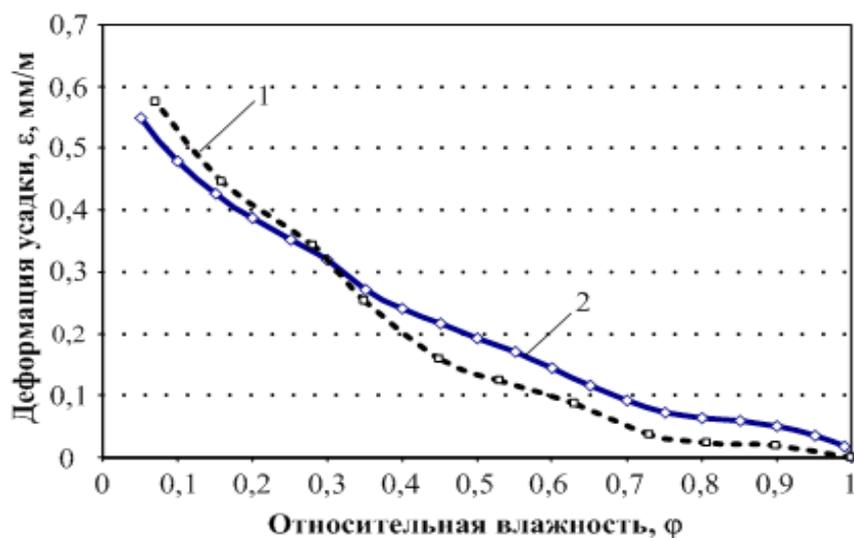


Рисунок 5. Абсолютные деформации:  
1 – эксперимент; 2 – расчет

Разработанные двумерные модели структуры цементного бетона, в явном виде включающие структурные элементы на различных масштабных уровнях в диапазоне размеров от 25 нм до 5 мм, отражают реальные свойства материала. Достоинством предлагаемой методики моделирования цементных систем, на наш взгляд, является возможность количественной интегральной оценки свойств материала с учетом тесной взаимосвязи различных структурных уровней – от нанометра до миллиметра. Данный подход позволяет выявить степень влияния различных факторов, определяющих особенности структуры, на интересующие исследователя свойства материала.

Разработанный алгоритм моделирования механизма влажностной усадки, учитывающий капиллярное давление и деформации от изменения свободной поверхностной энергии в зависимости от относительной влажности окружающей среды отражает реальную картину собственных деформаций цементных систем, что следует из сопоставления результатов моделирования и экспериментального определения влажностной усадки для различных вариантов состава цементного камня, цементно-песчаных композиций и крупнозернистого бетона.

## Литература

- Bentz, D.P. (2011). Critical Observations for the Evaluation of Cement Hydration Models. *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*, 2(3), pp.75–82.
- Buffo-Lacarrière, L., Sellier, A., Escadeillas, G., Turatsinze, A. (2007). Multiphase finite element modeling of concrete hydration. *Cement and Concrete Research*, 7, pp.131–138. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.11.010
- Garbocz, i E.J., Bentz, D.P., Frohnsdorff, G.J. (2000). The Past, Present, and Future of the Computational Materials Science of Concrete. In: *Proceedings of the Center for Advanced-Cement-Based Materials (ACBM)*.
- Haecker, C.-J. et al. (2005). Modeling the linear elastic properties of Portland cement paste. *Cement and Concrete Research*, 35, 1948–1960. DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.05.001
- Jennings, H.M. et al. (2007). A multi-technique investigation of the nanoporosity of cement paste. *Cement and Concrete Research*, 37, pp.329–336. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.03.021
- Kharitonov, A. (2007). Nanostructured model cement stone. *Popular concrete*, 16, pp.23–25.
- Kharitonov, A. (2008). *Modeling of cement stone structure at the nanoscale processes and shrinkage "PoreSolution"*. Saint Petersburg.
- Kharitonov, A., Komokhov, P. (2009). The influences of internal and external factors on a dry shrinkage of cement systems. *Academia. Architecture and Construction*, 2, pp.77–80.
- Leitea, J.P.B., Slowik, V., Mihashi, H. (2004). Computer simulation of fracture processes of concrete using mesolevel models of lattice structures. *Cement and Concrete Research*, 34, pp.1025–1033.
- Pucharenko, Y., Chrevko, S., Suvorov, I. (2013). Influence of composition on shrinkage of Fiber - foam Concrete. *Bulletin of Civil Engineers*, 41, pp. 109–112.
- Pucharenko, Y., Morozov, V. (2013). A Structural Model and Strength Predicting of Fiber-Reinforced Concrete. *Word Applied Sciences Journal*, 23, pp.111–116.
- Pukharenko, Yu., Aubakirova, I. (2016). Structural Features of Nanomodified Cement Stone. *Architecture and Engineering*, 1(1), pp. 66–70. DOI: 10.23968/2500-0055-2016-1-1-66-70
- Shahsavari, R. (2011). *Hierarchical modeling of structure and mechanics of cement hydrate*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- Smirnova, O. (2012). Dependence of the strength of concrete with polycarboxylate-based additives on the properties of Portland after low-temperature thermal-curing. *Proceedings of the universities – Civil Engineering*, 9, pp.20–27.
- Sychev, S., Badin, G. (2016). An interactive construction project for method of statement based on BIM technologies for high-speed modular building. *Architecture and Engineering*, 1(4), pp.36–41. DOI: 10.23968/2500-0055-2016-1-4-36-41
- Tennis, P.D., Jennings, P.D. (2000). A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 30, pp.855–863.
- Wittmann, F.H., Roelfstra, P.E., Sadouki, H. (1984). Simulation and analysis of composite structures. *Material Science Engineering*, 68, pp.239–248.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СВОДА ПОКРЫТИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБЪЕКТА

Михаил Кирсанов<sup>1</sup>, Сергей Астахов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Россия, 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14

C216@ya.ru<sup>1</sup>

### Аннотация

Статически определимая плоская ферма моделирует свод промышленного объекта. Для вывода зависимости прогиба конструкции от числа панелей в пролете применяется формула Максвелла - Мора, система компьютерной математики Maple и метод индукции. Усилия в стержнях определяются методом вырезания узлов. Рассмотрены несколько случаев загрузки: равномерно распределенной по верхнему и нижнему поясу, по боковой поверхности и сосредоточенной силой. Для аналитической оценки прочности конструкции выведены формулы для усилий в наиболее сжатых и растянутых стержнях и выражение для смещения опоры. Найдена асимптотика решения по числу панелей при фиксированной длине пролета и суммарной нагрузке.

### Ключевые слова

Балка, деформация, введение в эксплуатацию, точное решение, Maple.

### Введение

Расчет стержневых конструкций с большим числом элементов обычно производят в специализированных пакетах, основанных на методе конечных элементов. Не умаляя роль численных расчетов (Samofalov and Žiūkas, 2015), отметим, что в последнее время с развитием методов компьютерной математики (Maple, Mathematica, Maxima и др.) появилась реальная возможность аналитических расчетов с компактными результирующими формулами для усилий в критических (наиболее сжатых или растянутых) стержнях, прогиба и смещения опор (Kirsanov, 2012). Наиболее эффективны решения для регулярных периодических структур, для которых в решение можно внести и натуральный параметр, равный, например, числу ячеек периодичности. Индуктивный метод работоспособен и в случае, если система имеет два независимых параметра периодичности. Пример решения такой задач представлен ниже. Без значительных изменений алгоритм может быть реализован и в других системах компьютерной математики.

### Постановка задачи

Ферма на рисунке 1 представляет собой модель свода покрытия промышленного объекта. Параметр  $n$  задает число панелей в половине пролета фермы,  $m$  – число панелей по вертикали опорных элементов. Симметричная конструкция состоит из двух ферм-стоек и фермы ригеля. Горизонтальные и вертикальные размеры панелей, образующие эти части приняты одинаковыми. С одной стороны, это диктуется соображениями унификации элементов, облегчающими их монтаж, транспортировку и изготовление. С другой стороны, существенно упрощается расчет. В любом случае полученная формула будет предназначена для оценочной, хотя и достаточно точной, характеристики сооружения. Точность аналитических формул, полученных методом индукции (Ilin and Kirsanov, 2016; Kirsanov, 2016b; Ponamareva, 2016), особенно проявляется для конструкций с большим числом элементов, там, где численные методы, частью которых неизбежно является решение системы линейных уравнений, имеют тенденцию к накоплению ошибок округления.

Расчет производится на несколько видов нагрузок. Ферма содержит  $k=8(n+m+1)$  стержней, включая три опорные. Усилия в стержнях вычисляем по программе (Kirsanov, 2012). Ввод данных в программу начинается с заданием координат шарниров (рисунок 2). Приведем фрагмент программы на языке Maple. Координаты узлов регулярных (периодических) систем задаются в циклах. Это упрощает ввод данных:

```
> for i to m do
```

```

> x[i]:=b; y[i]:=h*i;

> x[i+m+2*n-1]:=a+a*2*n;

> y[i+m+2*n-1]:=m*h+h-i*h;

> od:

> for i to m+1 do

> x[i+2*m+2*n-1]:=0;y[i+2*m+2*n-1]:=i*h-h;

> x[i+3*m+4*n+3]:=2*b+a*2*n; y[i+3*m+4*n+3]:=m*h+h-i*h;

> od:

> for i to 2*n-1 do

> x[i+m]:=b+a*i; y[i+m]:=h*m;

> od:

> for i to 2*n+1 do

> x[i+3*m+2*n+1]:=a*i-a+b; y[i+3*m+2*n+1]:=h*m+h;

> od:

> x[3*m+2*n+1]:=0: y[3*m+2*n+1]:=m*h+h;

> x[3*m+4*n+3]:=2*b+2*n*a:y[3*m+4*n+3]:=m*h+h;
    
```

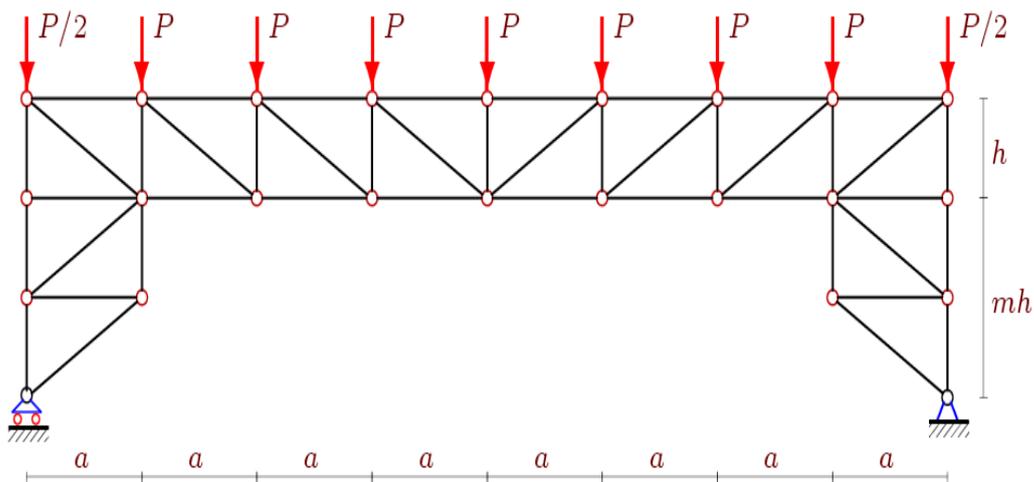
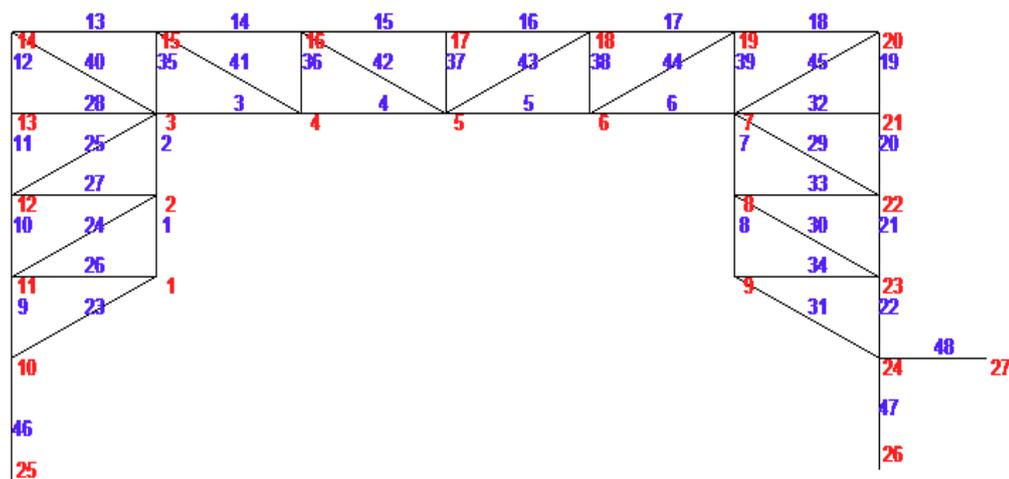


Рисунок 1. Ферма при  $n=3, m=2$ . Нагрузка по верхнему поясу

Решетка фермы задается по тому же принципу, что структура графов в дискретной математике — заданием специальных векторов, содержащих номера концов стержня. Стержни на внутренних сторонах опорных элементов и нижнем поясе (рисунок 2) представлены векторами:

```
for i to 2*n+2*m-2 do N[i]:= [i,i+1];od:
```

Эти векторы никак не связаны с величинами и знаками усилий в соответствующих стержнях. Более того, они нечувствительны к выбору условного конца и начала стержня. Нумерация стержней ведется сначала по внутренним стойкам опор и нижнему поясу ригеля, потом по внешним стойкам и верхнему поясу. Далее нумеруются стойки и раскосы фермы. Матрица  $G$  системы уравнений равновесия содержит направляющие косинусы усилий, которые вычисляются по координатам узлов.

Рисунок 2. Нумерация узлов  $n=2$ ,  $m=3$ 

В нечетные строки матрицы  $G$  размером  $k \times k$  записываются направляющие косинусы с осью  $x$ , в четные — с осью  $y$ :

```
> for i to k do
> Lxy[1]:=x[N[i][2]]-x[N[i][1]]: # Проекция стержня на ось x
> Lxy[2]:=y[N[i][2]]-y[N[i][1]]: # Проекция стержня на ось y
> L[i]:=sqrt(Lxy[1]^2+Lxy[2]^2): # длина стержня
> for j to 2 do
> t:=2*N[i][2]-2+j:
> if t<=k then G[t,i]:=-Lxy[j]/L[i]:fi;
> t:=2*N[i][1]-2+j:
> if t<=k then G[t,i]:= Lxy[j]/L[i]:fi;
> od;
> od:
```

Условный оператор `if t<=k then` предупреждает программу от выхода за пределы матрицы  $G$ .

Правая часть системы уравнений равновесия  $G\bar{S} = \bar{B}$  представляет собой вектор, в нечетные элементы которого вводятся горизонтальные нагрузки, в четные — вертикальные. В данном случае требуется два

таких вектора, обозначенные в программе как  $B_p$  и  $B_1$ . В первом содержится информация о приложенной равномерной нагрузке по верхнему поясу.

```
> Bp [2*(3*m+2*n+1)]:=1/2: Bp[2*(3*m+4*n+3)]:=1/2:
> for i from 3*m+2*n+2 to 3*m+4*n+2 do Bp[2*i]:=1: od:
```

во втором — единичная вертикальная сила на средний узел (номер  $m+n$ ) нижнего пояса, в котором измеряется прогиб

```
> B1[2*(m+n)]:=1:
```

### Решение. Нагрузка по верхнему поясу

Система Maple дает решение в символьной форме методом обратной матрицы. Матрица находится просто, как в элементарной алгебре  $1/G$ . Найденные усилия подставляются в формулу Максвелла- Мора:

$$\Delta = \sum_{i=1}^{k-3} S_i s_i l_i / (EF)$$

где  $S_i$  — усилия в стержнях фермы от действия распределенной нагрузки,  $s_i$  — усилия от единичной вертикальной нагрузки в среднем узле нижнего пояса,  $l_i$  — длины стержней,  $E$  — модуль упругости,  $F$  — площадь сечения стержней. В сумму не входят три опорные стержня, которые приняты жесткими. Общий вид формулы для прогиба ферм с разным числом панелей отличается только значениями коэффициентов:

$$E F \Delta = P \frac{A a^3 + C c^3 + D h^3}{2h^2}, \quad (1)$$

где  $c = \sqrt{a^2 + h^2}$

Методом индукции получены следующие выражения для коэффициентов:

$$A = \frac{5n^4 + 20n^3 + 31n^2 + 22n + 6}{6},$$

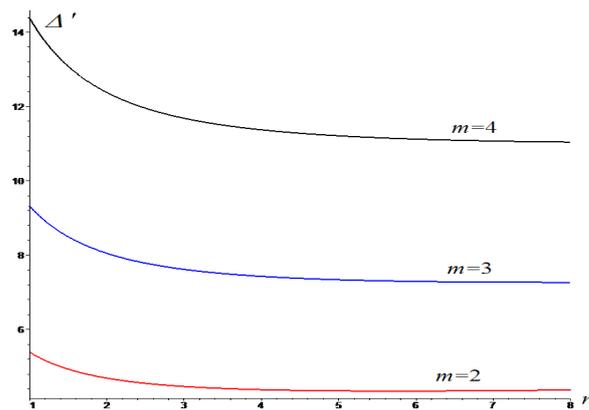
$$C = (n+1)^2,$$

$$D = 2m + n^2 + n(2m+3) + 1.$$

Алгоритм индукции по двум параметрам состоит из двух частей. Сначала при фиксированном  $m=1$  получается последовательность решений и соответствующих коэффициентов при степенях (кубах) размеров для ферм с числом панелей  $n=1,2,3,\dots$ . На этом этапе выводятся общие члены этих последовательностей. Применяется оператор `rgf_findrecur` пакета `genfunc` системы Maple. Для коэффициента  $A$  получено следующее рекуррентное уравнение пятого порядка

$$A_n = 5A_{n-1} - 10A_{n-2} + 10A_{n-3} - 5A_{n-4} + A_{n-5}$$

Решение этого уравнения дает оператор `rsolve`. Аналогичный вид имеют уравнения для коэффициентов  $C$  и  $D$ . Во второй части алгоритма необходимо выполнить обобщение по  $m$ . Для этого принимается  $m=2$  и повторяется первая часть алгоритма с индукцией по  $n$ . Так продолжается до тех пор, пока не выявится закономерность коэффициентов. Сразу замечается, что в данной задаче коэффициенты  $A$  и  $C$  не зависят от высоты боковых опорных ферм, определяемых параметром  $m$ . В результате двойная индукция относится лишь к коэффициенту  $D$ , в котором при изменении  $m$  меняются лишь два слагаемых. Здесь для определения их вида не требуется мощный аппарат операторов индукции из пакета `genfunc`.

Рисунок 3. Зависимость прогиба от числа  $n$ 

На рисунке 3 показано изменение прогиба в зависимости от размеров фермы и числа панелей  $n$ . Кривые безразмерного прогиба  $\Delta' = \Delta EF / (P_s L)$  построены при фиксированной длине пролета  $L = 2a(n+1) = 40$  м, высоте  $H = (m+1)h = 10$  и постоянной суммарной нагрузке  $P_s = 2P(n+1)$ .

С увеличением числа панелей в данной постановке прогиб медленно убывает. Зависимость же от  $m$  почти линейная.

Ход кривых подсказывает наличие асимптот. Действительно, предел:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \Delta' / n = H / (2(m+1)L) \quad (2)$$

показывает, что угол наклона асимптоты зависит от размеров фермы и числа панелей по высоте. С увеличением числа панелей по высоте при постоянной общей ее высоте прогиб растет. Очевидно, это вызвано в первую очередь наклоном опорных частей. Аналогично, предел по числу  $m$  при постоянном  $n$  имеет следующую величину:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{\Delta'}{m^2} = \frac{L^2(12 + 10n + 5n^2)}{192H^2(n+1)^2}$$

Здесь прямолинейной асимптоты нет и зависимость стремится к квадратичной по  $m$ . Усилия в критических (наиболее сжатых  $S_{3m+3n}$  и наиболее растянутых  $S_{m+n-1}$  в середине верхнего и нижнего пояса соответственно, рис. 2) определяем также по индукции. Как и ожидалось, эти усилия не зависят от числа панелей по высоте конструкции:

$$S_{3m+3n} = -P(n+1)^2 a / (2h), \quad S_{m+n-1} = Pn(n+1)a / (2h).$$

### Нагрузка по нижнему поясу

Свойство линейности задачи по нагрузкам позволяет комбинировать решения, полученные для различных типов нагружения. Рассмотрим нагружение равномерной нагрузкой нижнего пояса ригеля фермы (рисунок 4). Используя уже составленную систему уравнений и изменив лишь ее правую часть

```
> for i from m+1 to m+2*n-1 do np:=i; Вр[2*np]:=1: od;
```

выведем формулу для прогиба фермы. Результат почти не отличается по форме от (1) для нагрузки по верхнему поясу и имеет вид:

$$E F \Delta = P \frac{A a^3 + C c^3 + D h^3}{4 h^2} \quad (3)$$

где коэффициенты также получены двойной индукцией по  $n$  и  $m$ :

$$A = \frac{5n^4 + 20n^3 + 19n^2 - 2n - 6}{3},$$

$$C = 2(n^2 + 2n - 1),$$

$$D = (2m + 1)(2n - 1) + 2n^2.$$

Предельные свойства по параметру  $n$  при  $P_s = P(2n-1)$  и прежних условиях на длину пролета  $L$  и высоту  $H$ , полностью совпадают с (2). Предел по числу панелей по вертикали  $m$  имеет вид:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{\Delta'}{m^2} = \frac{L^2(5n^4 + 20n^3 + 25n^2 + 10n - 12)}{96H^2(n+1)^3(2n-1)}.$$

### Нагрузка в середине пролета

Самый простой тест на деформативность конструкции — реакция на сосредоточенную силу в середине пролета. Решение этой задачи существенно расширяет область применения построенных решений (1) и (3) за счет линейной их комбинации. При этом решение задачи о сосредоточенной силе моделирует нагружение конструкции какой-либо полезной нагрузкой — крановое оборудование, станки, и пр. Формула Максвелла-Мора в этом случае упрощается:

$$\Delta = P \sum_{i=1}^{k-3} s_i^2 l_i / (EF)$$

где как и ранее  $s_i$  — усилия в стержне  $i=1, \dots, k$  от действия единичной вертикальной нагрузки в среднем узле нижнего пояса. Таким образом вычисляется вертикальное перемещение точки приложения силы в середине пролета. Вид решения совпадает с (3). Коэффициенты при этом имеют вид:

$$A = \frac{2(2n^3 + 6n^2 + 7n + 3)}{3},$$

$$C = 2(n+1),$$

$$D = 2(m+n)+1.$$

Предельные асимптотические свойства для безразмерного прогиба  $\Delta' = \Delta EF / (PL)$  по числу панелей  $n$  характеризуются следующими значениями пределов:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \Delta' / n = H / ((m+1)L)$$

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{\Delta'}{m^2} = \frac{L^2(3+2n+n^2)}{24H^2(n+1)^2}$$

### Боковая нагрузка

Для конструкций небольшой высоты ( $m$  мало) влияние боковой нагрузки (например, ветровой) на деформации несущественно. Однако, если высота сооружения сопоставима или больше горизонтального размера, суммарная горизонтальная нагрузка может внести заметный вклад в величины деформаций сооружения. На основе уже построенной математической модели несложно вывести формулу для горизонтального смещения верхней точки ригеля (точка с номером  $3m+2n+1$ , рисунок 2) при действии равномерной нагрузки по всей боковой поверхности фермы (рисунок 5).

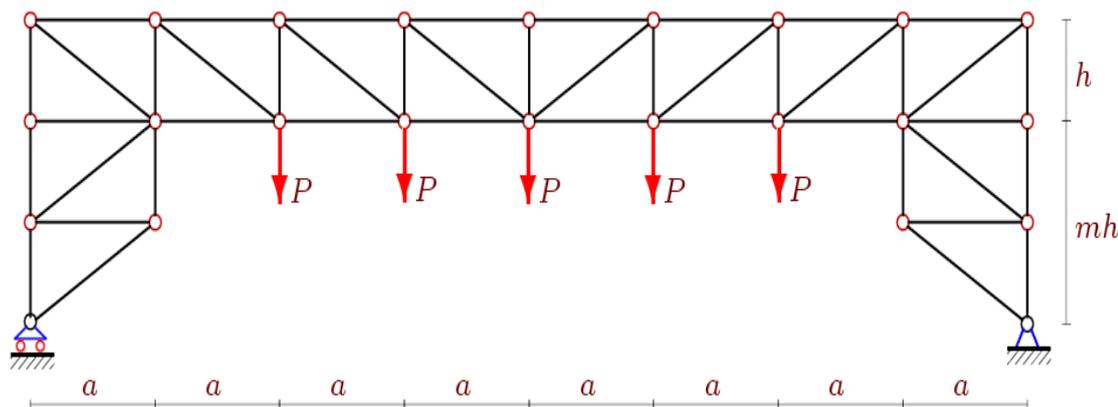


Рисунок 4. Нагрузка по нижнему поясу

Как и ранее нагрузка приводится к узлам фермы. Вектор правой части имеет следующий программный код:

```
> for i from 2*m+2*n to 3*m+2*n+1 do np:=i; Bp[2*np-1]:=1: od:
```

В данном случае индукцию проведем в обратном порядке — сначала по  $m$ , потом по  $n$ . Вначале замечаем, что общий вид выражения для прогиба будет следующий: (4)

$$E F \Delta = P \frac{A a^3 + C c^3 + D h^3}{4a^2 (n+1)^2}$$

Принимая  $n=1$  и проводя индукцию по  $m$ , получаем следующее выражение коэффициента при  $a^3$ :

$$A_1 = 38m^3 + 88m^2 + 30m + 12.$$

Аналогично получаем коэффициенты при  $n=2,3,\dots,8$ :

$$A_2 = 145m^3 + 346m^2 + 167m + 110,$$

$$A_3 = 364m^3 + 880m^2 + 476m + 344,$$

.....

$$A_8 = 4539m^3 + 11190m^2 + 6981m + 5514.$$

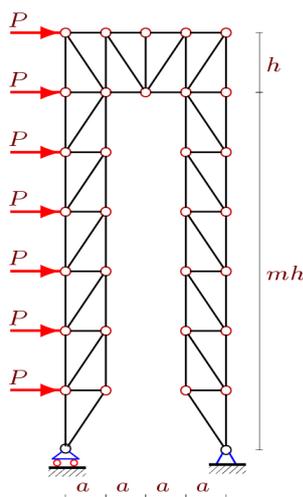
Для выявления закономерности построения этих выражений оказалось достаточным восемь шагов. Анализируя теперь уже коэффициенты при степенях  $m$  индукцией по  $n$  с помощью уже упомянутых операторов пакета `genfunc` получаем после упрощения окончательное выражение (вспомогательный индекс, соответствующий  $n$ , опущен):

$$A = ((n+1)(m+2)(m^2(20n^2 + 28n + 9) + 10mn^2 + 8mn + 14n^2 + 4n - 9)) / 3$$

Таким же образом, двойной индукцией, получаем и остальные выражения для коэффициентов в (4):

$$C = (n+1)(m+1)(m^2(4n+3) + 8mn + 6m + 2),$$

$$D = ((m+2)(m+1)(m^2(15+16n^2 + 25n) - 2m + 8mn^2 + 3mn - 3)) / 6.$$

Рисунок 5. Боковая нагрузка,  $n=1$ ,  $m=6$ 

Найдем предельные по числу панелей свойства безразмерного прогиба  $\Delta' = \Delta EF / (P_s L)$ , где в этот раз  $P_s = (m+1) P$ . Имеем следующие значения пределов:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\Delta'}{n^2} = \frac{8m(m+2)^2 H^3}{3(m+1)^3 L^3}$$

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{\Delta'}{m^2} = \frac{9 + 20n + 10n^2}{12(n+1)^2}$$

### Горизонтальное смещение опоры

Другой важной характеристикой деформативности фермы является степень подвижности ее опоры. Очевидно, для простой балочной фермы с параллельными поясами эта величина небольшая. Для арочных ферм и ферм рассматриваемого типа за счет высоты боковых опорных ферм (ферм-стоек) смещение опоры может быть значительным. Для контроля работы конструкции в процессе ее эксплуатации желательно знать эту величину и ее зависимость от размеров фермы и нагрузки.

Рассмотрим случай нагружения верхнего пояса (рисунок 1). Для определения величины смещения подвижной опоры применим формулу Максвелла – Мора, где в этот раз  $s_i$  – усилия в стержнях от единичной горизонтальной нагрузки, приложенной к левой опоре. Формула будет иметь вид:

$$EF\Delta = P \frac{Aa^3 + Cc^3 + Dh^3}{ah},$$

с коэффициентами:

$$A = m + \frac{n(22m+5)}{6} + \frac{n^2(8m+3)}{2} + \frac{n^3(4m+2)}{3},$$

$$C = m(2n+1),$$

$$D = (m^2 + 3m - 1)(n+1)$$

Здесь двойная индукция оказалась значительно сложнее. Все три коэффициента зависят от параметра  $m$ . При этом коэффициент имеет квадратичную зависимость по  $m$ , а коэффициенты  $A$  и  $C$  — линейную.

### Заключение

Методом индукции с применением в системы Марле выведены формулы для прогиба фермы и смещения опоры при различных нагрузках. Эти решения и их комбинации можно использовать для оценки точности и

достоверности численных результатов, полученных в специализированных пакетах строительной механики (Samofalov, Žiūkas, 2015). Компактные аналитические решения методом индукции на основе программы (Kirsanov, 2012a) получены в (Ilin, Kirsanov, 2016; Kirsanov, 2016b; Ponamareva, 2016; Dong, Kirsanov, 2016; Voropai, Kazmiruk, 2016; Voropai, 2016; Shipaeva, 2016; Bolotina, 2016). Сравнительный обзор некоторых аналитических решений дан в (Tinkov, 2015).

## Литература

Bolotina, T.D. (2016). The deflection of the flat arch truss with a triangular lattice depending on the number of panels. *Bulletin of Scientific Conferences*, 4-3(8), pp.7–8. DOI: 10.17117/cn.2016.04.03

Dong, X., Kirsanov, M.N. (2016). The dependence of the deflection of the truss from the position of the load for an arbitrary number of panels. *Bulletin of Scientific Conferences*, 1-4 (5), pp. 6–7. DOI: 10.17117/cn.2016.01.04

Ilin, I.A, Kirsanov, M.N. (2016). The deflection and displacement of the bearings of the truss with rhombic lattice. *Science Almanac*, 12-2(26), pp.216–219. DOI: 10.17117/na.2016.12.02.216

Kirsanov, M.N. (2012). *Maple i Maplet. Reshenie zadach mekhaniki [Maple and Maplet. Solving mechanics problems]*. Saint-Petersburg: Publishing House "Lan". (in Russian)

Kirsanov, M.N. (2016a). Analysis of the buckling of spatial truss with cross lattice. *Magazine of Civil Engineering*, 4, pp.52–58. DOI: 10.5862/MCE.64

Kirsanov, M.N. (2016b). An inductive method of calculation of the deflection of the truss regular type. *Architecture and Engineering*, 1(3), pp. 14–17. DOI: 10.23968/2500-0055-2016-1-3-14-17

Ponamareva, M.A. (2016). The displacement of the support trusses with parallel belts under uniform load. *Science Almanac*, 4-3(18), pp. 257–259. DOI: 10.17117/na.2016.04.03.257

Samofalov, M., Ziukas, A. (2015). Investigation of mechanical state of spatial roof from steel trusses on asymmetric building. *Mechanics*, 21(1), pp.11–18. DOI: 10.5755/j01.mech.21.1.10129

Shipaeva, A.S. (2016). Calculation of the deflection of girder beam loaded on the bottom flange in the system Maple. *Science Almanac*, 5-3(19), pp. 236–239. DOI: 10.17117/na.2016.05.03.236

Tinkov, D.V (2015). Comparative analysis of analytical solutions to the problem of truss structure deflection. *Magazine of Civil Engineering*, 5(57), pp. 66–73. DOI: 10.5862/MCE.57.6

Voropai, R.A. (2016). Analysis of the deflection of the regular truss with cross type lattice. *Science Almanac*, 4-3(18), pp.238–240. DOI: 10.17117/na.2016.04.03.238

Voropai, R.A., Kazmiruk, I.Yu. (2016). Analytical study of the horizontal stiffness of the flat statically determinate arch truss. *Bulletin of Scientific Conferences*, 2-1(6), pp.10–12. DOI: 10.17117/cn.2016.02.01

## ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСПОРТА ПО КРИТЕРИЮ L6T-4 БАРТИНИ

Юрий Котиков

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-ая Красноармейская ул., д.4

cotikov@mail.ru

### Аннотация

Обзор показателей работы и энергоэффективности перевозок отмечает недостаток в их структуре квадрата скорости доставки. Отмечается необходимость привлечения квадрата скорости как основного фактора формирования оценки энергоёмкости движения объекта и сопротивления среды. Рассматривается авторский подход к формированию оценок энергоэффективности транспорта, основанный на использовании LT-систематизации Бартини и сущности *Transfer* с единицей измерения *Tran*. Коэффициент энергоэффективности перемещения груза представлен в виде отношения неизбежной диссипации энергии движения груза к затратам автотранспортного комплекса на энергетическое обеспечение перевозки.

В качестве примера выполнен расчет перевозки автомобилем КамАЗ-5320. Значение показателя энергоэффективности транспортирования со скоростью 60 км/час, рассчитанного с использованием *Transfer*, составило  $\eta = 11,6\%$ . Это позволило оценить технологический уклад с современным автотранспортом - как весьма далёкий от совершенства.

### Ключевые слова

Автомобильный транспорт, энергия, квадрат скорости, LT-систематизация, Тран, энергоэффективность, жизненный цикл.

### Введение

Нет ни одного объекта реального мира, который мог бы существовать без ресурса, мерой которого является энергия - величина, характеризующая способность совершать действие. Основным результатом труда человеческого общества всех времён и народов является концентрация энергии.

Транспорт захватывает для своей работы более четверти всех используемых энерго-ресурсов планеты. Процесс продвижения энергии от первичных источников через множество различных преобразователей до парка транспортных машин, а затем превращение его этим парком в транспортную работу по сути своей является логистическим процессом (Котиков, Ложкин, 2006). В роли глобального логистического менеджера выступает научно-техническое сообщество планеты. Транспортники же подключаются к этому менеджменту на последнем этапе – производстве транспортной работы и предоставлении транспортных услуг.

Главная оперативная задача перевозчика – доставить груз по назначению точно в срок. Вместе с тем, в стратегическом и историческом ракурсе идет постоянная борьба за повышение скоростей доставки грузов.

### Предмет, задачи и методы

Перевозки – весьма энергоёмкий вид деятельности. Оценка его энергоёмкости – актуальная задача нескольких столетий. На практике применяется ряд общепризнанных показателей оценки работы и энергоэффективности перевозки: т-км, км/литр, mpg, kJ/t-km, BTU/(ton-mile), другие (International Energy Outlook, 2016; Transportation Energy Data Book, 2016). Однако, как правило, в них не учитывается непосредственно скорость доставки объекта – весьма важный фактор логистики. Кроме того, если учесть фактор энергозатрат, то важнее является даже не скорость, а квадрат скорости – поскольку энергия любого движения (и сопротивления среды этому движению) пропорциональна именно квадрату скорости реализации процесса.

В последнее время появилась, однако, возможность развить новый методологический подход в оценке энергоэффективности транспорта и предоставляемых им транспортных услуг, который учитывал бы квадрат

скорости доставки объекта. Этот подход связан с освоением идей Роберта Бартини по геометрической LT-систематизации законов физики на базе пары координатных параметров Длина – Время (L-T) (Бартини, 1965; Бартини, Кузнецов, 1974).

Обратимся к общефизическим понятиям. В 1855-1973 г. Дж. Максвеллом высказывалась мысль, что для построения системы единиц измерений достаточно двух величин: длины и времени. В частности им определена размерность для массы  $[L^3T^{-2}]$  (вместе с обозначением размерности любой физической величины в виде квадратных скобок).

В течение столетия шло осмысление этого утверждения, а с 1965 г. последовал ряд публикаций Р. ди Бартини, П. Г. Кузнецова, А. Г. Алейникова и других, получивших ряд важных результатов (Бартини, 1965; Бартини, Кузнецов, 1974; Образцова, Кузнецов, Пшеничников, 1997; Aleinikov, 2007).

Предложенная Бартини кинематическая система физических величин (Таблица Бартини (ТБ), (фрагмент ТБ см. в таблице 1) (Aseev, 2012) состоит из вертикальных столбцов, представляющих собой ряд степеней длины  $L$  и горизонтальных строк – степеней времени  $T$ . Пересечение каждого столбца и каждой строки дает размерность той или иной физической величины размерности  $[L^R T^S]$ , где  $R$  и  $S$  – целые числа.

Таблица 1. Матрица физических законов и измерений

Space Time	$L^1$	$L^2$	$L^3$	$L^4$	$L^5$	$L^6$
$T^{-6}$			$L^3 \cdot T^{-6}$	$L^4 \cdot T^{-6}$	$L^5 \cdot T^{-6}$	Speed of capacity transition (mobility)
$T^{-5}$		Change of pressure	Surface capacity	Speed of force change	Power	Speed of energy transition
$T^{-4}$	Pressure gradient	Pressure	Angular acceleration of the mass	Force	Energy Work	Speed of transition of impulse moment ( <b>tran</b> )
$T^{-3}$	Mass speed Current density	Gradient Viscosity	Mass discharge rate Current	Impulse	Moment of Impulse	
$T^{-2}$	Linear acceleration	Potential of gravitational field	<b>Mass</b>			
$T^{-1}$	Linear speed	Speed of change of the square	Volume discharge rate	Speed of volume transition		
$T^0$	Length	Square	Volume			

Горизонтальные строки таблицы являются трендами пространственных ресурсов. Размерности свойств всех элементов тренда имеют в своем составе множитель  $L^+1$ , который передается по наследству от свойства к свойству слева направо, и назван геном длины. Аналогично пространственным трендам введено понятие временных трендов - это столбцы таблицы. В столбцах от свойства к свойству снизу вверх передается ген времени  $T^{-1}$ . Также в таблице Бартини определено понятие вещественно-полевых ресурсов (ВПР) - это диагональ таблицы, проходящая слева снизу направо вверх. Тренды ВПР образуют семь диагоналей, содержащие физические свойства с размерностями  $L^m T^{-n}$ , при  $|m+n| \leq 3$ . Все тренды ВПР от поколения к поколению передают ген скорости  $L^1 T^{-1} = V+1$ . Сумма показателей степеней величин, лежащих на отдельном тренде, совпадает и отличается от суммы показателей степеней величин соседних трендов на единицу (Математический базис изобретательской физики, 2012).

Отметим размерность следующих классических величин: длины –  $L^1 T^0$ ; массы -  $L^3 T^{-2}$ ; энергии -  $L^5 T^{-4}$ ; мощности -  $L^5 T^{-5}$ ; транспортной работы в т·км –  $L^4 T^{-2}$ .

Бартини также была предложена величина *Мобильность* с размерностью  $L^6 T^{-6}$ . Далее, Бартини совместно с Кузнецовым П. Г. была предложена величина с размерностью  $L^6 T^{-4}$ , представляющая собой Смещение (передачу на расстояние) энергии (Бартини, Кузнецов, 1974). Позже (Образцова, Кузнецов, Пшеничников, 1997) было предложено название для единицы Смещения: «Тран» с размерностью  $[L^6 T^{-4}] = (т \cdot км) \cdot км^2 / ч^2$ .

Алейников А.Г. со своей исследовательской группой развил ТБ (Aleinikov, 2007), введя в неё 9 новых законов сохранения. Также Алейников предложил именовать единицу *Мобильности*  $L^6 T^{-6}$  как Барт, величину  $L^6 T^{-4}$  - назвать *Transfer* с единицей измерения *Tran*.

Этой терминологии будем придерживаться в данной статье. Нужная нам часть матрицы законов в представлении Алейникова А.Г., как полотно (canvas) для нашего исследования, отражена на рисунке 1.

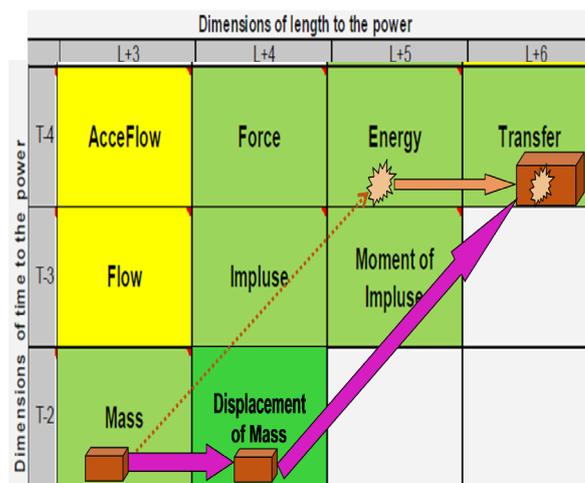


Figure 1. Part of Matrix of physical laws as a canvas for analysis

Формирование сущности *Transfer* можно представить с помощью рисунка 1 как произведение массы груза  $M$  на расстояние  $L$  (перенос массы груза на это расстояние), с образованием выработки  $W_p$  в т-км, и затем умножение величины выработки  $W_p$  на квадрат скорости  $V^2$ , реализуемой при этом переносе (Котиков, 2001; Котиков, 2005а; Котиков, 2005b; Котиков, Ложкин, 2006). Если принять выработку  $W_p$  за меру инерции перевозок, то можно отметить подобие отображений:  $W_p \cdot V^2 = S \sim M \cdot V^2 = E$ .

Подобно тому, как для физического тела (с мерой инерции тела – массой) квадрат скорости играет роль коэффициента, отражающего уровень способности совершать работу (действие) в гравитационном поле – так и для перевозки (с мерой инерции – *Выработкой (Displacement of Mass)*) квадрат скорости может играть роль коэффициента, отражающего уровень способности совершать работу (действие) в экономическом поле.

Применение *Transfer* должно приводить к такой системе стимулирования, которая в целом требует более высокого темпа перевозок. *Transfer* точнее всего отражает энергетическую суть транспортного процесса. Этим самым определяется его роль уравнивающего энергетического критерия между спросом и предложением транспортных услуг – поскольку экономические оценки, как спроса, так и предложения в конечном итоге базируются на энергетических ресурсах и их стоимости. Ведь желательный высокий уровень спроса на скорость доставки встречается с необходимыми на это энергозатратами (и то, и другое зависит от квадрата скорости доставки).

То есть *Transfer* способен выступать в роли оценщика транспортной услуги. Наличие в структуре *Transfer* сомножителя в виде квадрата скорости означает для заказчика, что удовлетворение желательного уровня скорости доставки вызовет увеличение тарифа (зависящего от энергопотребления) пропорционально увеличению квадрата скорости доставки.

Транспортная услуга *Transfer* размером в 1 *Тран* равна полезной работе, затраченной на перемещение груза массой 1 т на расстояние 1 км со средней скоростью движения 1 км/ч. Размерность единицы этой услуги –  $t \cdot км^3/ч^2$ .

Далее, 1 *тран* =  $1 т \cdot (км/ч)^2 \cdot км = 1000 кг \cdot (1/3,6)^2 м^2/с^2 \cdot км = 77,16 Дж \cdot км$ . Таким образом, 1 *Тран* можно представить как энергию величиной 77,16 Дж, необходимую для перемещения объекта перевозок массой 1 т в условиях гравитационного поля Земли на 1 км.

В системе транспортировки грузов мы встречаемся с двумя видами мощности: с мощностью собственно транспортного потока и с мощностью фронта погрузочно-разгрузочных и терминально-складских средств. Обе мощности направлены на достижение общей цели: обеспечить необходимую народному хозяйству (или цепи поставок) скорость доставки.

В процесс транспортировки груза входит множество погрузочно-разгрузочных операций и складских задержек, способных занимать до 80% общего времени доставки по цепи. Компенсировать задержку груза на вспомогательных операциях большей скоростью движения нерационально, так как это приводит к резкому увеличению расхода топлива и износу силовой установки. *Transfer* может играть немаловажную критериальную роль в оптимизации распределения энергозатрат на реализацию названных двух видов мощности потоков

транспортной инфраструктуры. Также высокой может оказаться роль *Transfer* в оценке энергоэффективности как процесса перевозок в целом, так и отдельных его этапов.

### Пример

Приведем пример формирования оценки энергоэффективности процесса транспортировки груза посредством АТС КамАЗ-5320.

Общие энергозатраты автотранспортного комплекса на подготовку и реализацию перевозки грузов укрупнено складываются из составляющих энергозатрат следующих сфер действия:

- 1) производство автотранспортных средств;
- 2) строительство и содержание автомобильных дорог;
- 3) обеспечение перевозок топливом и эксплуатационными материалами;
- 4) поддержание работы техники и персонала;
- 5) управление дорожным движением;
- 6) погрузочно-разгрузочные и транспортно-складские работы;
- 7) связь и управление транспортно-логистическим процессом;
- 8) утилизация транспортных конструкций как завершение их жизненного цикла (ЖЦ).

Ограничимся, однако, в примере первыми четырьмя сферами. Используем методические наработки и данные авторских работ (Котиков, 2001; Котиков, 2005а; Котиков, 2005b; Котиков, Ложкин, 2006).

Если сопоставить значение Транспортной услуги (в Тран), обеспечиваемой одним автомобилем, с суммарной энергией, вложенной АТК в осуществление перевозки груза этим автомобилем, то можно будет получить коэффициент энергоэффективности (КЭ) этой перевозки.

Каждая из названных четырех названных сфер имеет свой ЖЦ. Наиболее адекватными будут оценки обобщенного для четырех сфер КЭ, построенные на базе ЖЦ транспортного средства. В завершение процедуры расчета приведем все показатели к одному километру пути автомобиля, поскольку Тран/км имеет размерность Энергии.

Грузовой автомобиль КамАЗ-5320, везя 8 т груза со скоростью движения 60 км/ч и пробегая за год 50 тыс. км, выполняет годовой объем услуг  $S_{год} = 8 \times 50000 \times (60^2) = 1,44 \cdot 10^9$  тран =  $1,44 \cdot 77,16 \cdot 10^9 = 111,1$  ГДж·км. За 7 лет, набегая гарантийный пробег 350 тыс. км (условно примем это за ЖЦ АТС), он выполняет объем услуг по перемещению груза  $S_{жц} = 111,1 \times 7 = 777,7$  ГДж·км = 2,222 МДж x 350000 км. То есть, «абсолютно чистые» энергозатраты, связанные с услугой по перемещению названного груза на расстояние 1 км со скоростью 60 км/ч, равны  $S_{км} = 2,222$  МДж (и они не зависят от вида ТС, а характеризуют средний уровень рассеиваемой на отрезке 1 км энергии движения массы 8 т в среде обитания (в гравитационном поле) при скорости доставки 60 км/ч).

Рассматриваем под грузом носитель – АТС, движущееся по АД: это конструкция с вложенной при ее изготовлении энергией  $E_k$ ; дорога с частью вложенной в нее энергии  $E_{a,d}$  (приведенной к конкретному АТС); топливо, энергия которого  $E_{топл}$  используется для продвижения АТС по АД в вязкой воздушной среде и связывающем транспортном потоке; расходимые эксплуатационные материалы с вложенной в них энергией  $E_{э,м}$ ; энергозатраты на ТО и ремонт с учетом энергии, вложенной в запасные части при их изготовлении и установке на АТС  $E_{т.о.р}$ ; прочие сопутствующие энергозатраты  $E_{п.с.э}$ . Сумма рассматриваемых статей энергозатрат.

$$E_{\Sigma жц} = E_k + E_{a,d} + E_{топл} + E_{э,м} + E_{т.о.р} + E_{п.с.э} \quad (1)$$

Суммарные энергозатраты на изготовление одного КамАЗ-5320 составляют  $E_k = 523$  ГДж.

Общий расход энергоресурсов на сооружение 1 м<sup>2</sup> дороги  $E_{с.д} = 535$  МДж/м<sup>2</sup>.

Суммарные энергозатраты на разовый ремонт дорожного покрытия названной дороги 290 МДж на 1 м<sup>2</sup>. За ЖЦ дороги длительностью 30 лет и периодичностью ремонта в 7 лет, т. е при трёх ремонтах, энергозатраты на ремонтные работы составят  $290 \times 3 = 870$  МДж/м<sup>2</sup>. То бишь вложенная в 1 м<sup>2</sup> такой дороги энергия с учетом содержания и ремонта дороги за ее ЖЦ в 30 лет составляет  $535 + 870 = 1405$  МДж/м<sup>2</sup>. Тогда за 7 лет ЖЦ АТС на 1 м<sup>2</sup> автомобильной дороги потребуется энергии:  $1405 \times 7/30 = 328$  МДж/м<sup>2</sup>.

При ширине дорожной полосы 4 м в один погонный метр полосы за ЖЦ АТС вкладывается энергия  $328$  МДж/м<sup>2</sup> × 4 м = 1311 МДж/м. При условной интенсивности движения по полосе 2000 авт./сут. через сечение полосы за 7 лет пройдет  $2000 \times 365 \times 7 = 5110000$  АТС. Тогда на 1 автомобиль, проходящий 1 пог.м по полосе, можно отнести энергию дороги  $1311$  МДж/м /  $5110000$  авт. = 0,257 кДж/м·авт. Наш автомобиль, пробежав 350 тыс. км, утилизирует  $E_{a,d} = 0,257$  кДж/м·авт ×  $350000000$  м = 90 ГДж энергии, вложенной в АД.)

**Обеспечение топливом и эксплуатационными материалами.** Пусть расход топлива автомобиля 34 л/100 км, тогда суммарный расход за 7 лет  $Q_t = 34 \times 3500 = 119000$  л. Количество химической энергии, заключенной в топливе:  $119000$  л ×  $35,3$  МДж/л = 4201 ГДж.

Кроме того, на изготовление промышленностью 1 кг дизельного топлива, согласно формуле (1), расходуется энергия 3,5 кВт·ч/кг топлива. Следовательно, в изготовление 119000 л топлива промышленностью вкладывается  $3,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг} \times 0,83 \text{ кг}/\text{л} \times 3,6 \text{ МДж}/\text{кВт}\cdot\text{ч} \times 119000 \text{ л} = 1244 \text{ ГДж}$ . Таким образом, суммарное количество первичной энергии, утилизированное через топливо  $E_{\text{топл}} = 4201 + 1244,5 = 5445 \text{ ГДж}$ .

**Эксплуатационные материалы.** Расход масла составляет 2 % расхода топлива, т. е.  $119000 \text{ л} \times 0,02 = 2380 \text{ л}$ . На изготовление такого количества масла затрачено энергии  $50 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг} \times 0,85 \text{ кг}/\text{л} \times 3,6 \text{ МДж}/\text{кВт}\cdot\text{ч} \times 2380 \text{ л} \approx 364,3 \text{ ГДж}$ . Расход антифриза – 200 л, это соответствует вложенной энергии  $4 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг} \times 1,07 \text{ кг}/\text{л} \times 3,6 \text{ МДж}/\text{кВт}\cdot\text{ч} \times 200 \text{ л} \approx 5 \text{ ГДж}$ . Расход свинца – 70 кг, это соответствует вложенной энергии  $23 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг} \times 3,6 \text{ МДж}/\text{кВт}\cdot\text{ч} \times 70 \text{ кг} \approx 6 \text{ ГДж}$  (Расход антифриза – 200 л, это соответствует (при удельных энергозатратах на изготовление антифриза 4 кВт·ч/кг) вложенной энергии  $4 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг} \times 1,07 \text{ кг}/\text{л} \times 3,6 \text{ МДж}/\text{кВт}\cdot\text{ч} \times 200 \text{ л} \approx 5 \text{ ГДж}$ . Расход свинца – 70 кг, это соответствует (при удельных энергозатратах на получение свинца 23 кВт·ч/кг) вложенной энергии  $23 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг} \times 3,6 \text{ МДж}/\text{кВт}\cdot\text{ч} \times 70 \text{ кг} \approx 6 \text{ ГДж}$ ). Всего  $E_{\text{э.м}} = 364+5+6 = 375 \text{ ГДж}$ .

**Энергозатраты на ТО и ремонт.** Энергетический эквивалент материалов (стали и чугун, алюминия, меди, резины, лаков, химикатов, топлива) на ремонтно-восстановительные нужды автомобиля КамАЗ-5320 (без запчастей) в пределах его ЖЦ: 77,2 ГДж/350 тыс.км.

Энергетический эквивалент материалов (стали и чугун, алюминия, меди, резины (без шин)) в виде запчастей при выполнении ремонта АТС КамАЗ-5320: 34,7 ГДж/350 тыс.км.

Прямые энергозатраты при выполнении ТО и ремонта АТС КамАЗ-5320: 139 ГДж/350 тыс.км.

Тогда суммарные энергозатраты на ТО и ремонт (с учетом энергии, вложенной в запасные части при их изготовлении и установке):  $E_{\text{м.о.р}} = 77,2 + 34,7 + 139 = 251 \text{ ГДж}$ .

**Сумма всех энергозатрат**, вложенных в обеспечение посредством грузового АТС транспортной услуги  $S = 777,7 \text{ ГДж}\cdot\text{км}$ , в соответствии с выражением (1), составляет  $E_{\text{ΣЖЦ}} = 523 + 90 + 5445 + 375 + 251 = 6684 \text{ ГДж} = 6684 \times 77,16 = 515737 \text{ Тран.}$  В расчете на 1 км это составляет  $E_{\text{Σкм}} = 6684 \text{ ГДж} / 350000 \text{ км} = 19,1 \text{ МДж}/\text{км}$ .

Таким образом, для оказания транспортной услуги – перемещения груза массой 8 т посредством грузового АТС КамАЗ 5320 со скоростью 60 км/ч, с неотъемлемой диссипацией в среду со стороны груза на километр его перемещения энергии 2,22 МДж, требуется вложить в автотранспортный комплекс 19,1 МДж энергии. Значение  $\eta = S_{\text{км}} / E_{\text{Σкм}} = 2,22 / 19,1 = 0,1162 = 11,62 \%$  и является показателем энергоэффективности процесса транспортирования со скоростью 60 км/час, осуществляемого автотранспортным комплексом посредством автомобиля класса КамАЗ-5320.

## Заключение

Вполне резонно полагать, что при учёте энергозатрат на управление дорожным движением, погрузочно-разгрузочные и транспортно-складские работы, управление транспортно-логистическим процессом, на утилизацию элементов ТС (это всё то, что мы опустили в примере) – значение показателя энергоэффективности  $\eta = S_{\text{км}} / E_{\text{Σкм}}$  будет снижаться. Это связано с тем, что учет соответствующих энергозатрат будет увеличивать знаменатель выражения, а неизбежное снижение темпа перевозки (скорости доставки по цепи) – уменьшать числитель этого выражения.

Столь низкая эффективность использования автотранспортным комплексом первичной энергии природных ресурсов (на уровне 11% и ниже) позволяет оценить действующий технологический уклад человечества с современным автотранспортом - как весьма далёкий от совершенства.

## Литература

Aleinikov, A. (2007). Nine new laws of conservation: future science horizons. In: *Proceedings of the Allied Academies International Conference*, 6(2), pp. 5–10.

Aseev, A.G. (2012). *Glamour and Emptiness of our world*. Available at: [http://noocosmology.com/article/glamour\\_and\\_emptiness\\_of\\_our\\_world.html](http://noocosmology.com/article/glamour_and_emptiness_of_our_world.html) (viewed on: 26.04.2017).

Бартини, Р.О. (1965). Некоторые соотношения между физическими константами. *Доклады Академии наук СССР*, 163(4), с. 861–864.

Бартини, Р.О., Кузнецов, П.Г. (1974). Множественность геометрий и множественность физик. *Труды семинара "Кибернетика электроэнергетических систем"*, 11 с. Доступно по ссылке: <http://www.metodolog.ru/01380/01380.html> (дата обращения 26.04.2017).

Котиков, Ю.Г. (2001). *Основы системного анализа транспортных систем*. СПб: СПбГАСУ, с.264.

Котиков, Ю. Г. (2005а). Анализ энергоэффективности транспорта с помощью измерителя Тран. *Интегрированная логистика*, 3, с.15–20.

Котиков, Ю. Г. (2005б). Энергетическая эффективность автотранспортного комплекса. *Вестник транспорта*, 4, с. 37–39.

Котиков, Ю.Г., Ложкин, В.Н. (2006). *Транспортная энергетика*. Москва: Издательский центр «Академия», с. 272.

Математический базис изобретательской физики. (2012). Доступно по ссылке: <http://www.ruleright.ru/ruls-171-1.html> (дата обращения: 07.04.2017).

Образцова, Р. И., Кузнецов, П. Г., Пшеничников, С. Б. (1997). *Инженерно-экономический анализ транспортных систем*. Новосибирск, с.156. Доступно по ссылке: [http://lib.uni-dubna.ru/search/files/ur\\_enj-ek-an/~ur\\_enj-ek-an.htm](http://lib.uni-dubna.ru/search/files/ur_enj-ek-an/~ur_enj-ek-an.htm) (дата обращения: 07.04.2017).

## ЧАШЕЧНЫЕ СМЕСИТЕЛИ С ВИБРОАКТИВАТОРОМ В ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Виктор Кузьмичев<sup>1</sup>, Владимир Верстов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-ая Красноармейская ул., д.4

kuzmichev\_va@mail.ru<sup>1</sup>, 5750195@mail.ru<sup>2</sup>

### Аннотация

Строительные смеси относятся к полидисперсным гетерогенным системам, на формирование которых оказывают большое влияние поверхностные явления, происходящие на границе раздела фаз. Для процессов перемешивания важнейшими из них являются адсорбционно-диффузионные, скорость протекания которых зависит от подвижности частиц минеральных компонентов, величины активной межфазной поверхности, дисперсности вяжущего, технологических особенностей процесса и других факторов. Одним из путей повышения интенсивности процессов смешивания, как известно, является применение вибрации.

В статье представлены оригинальные конструкции чашечных смесителей принудительного действия, в которых внутри камеры смешивания размещен виброактиватор. Устанавливается виброактиватор в «мертвых» зонах, расположенных вдоль геометрической оси камеры смешивания, где интенсивность процесса конвективного смешивания мала.

Рассмотрены методы проектирования уравновешенных эксцентриковых виброактиваторов прецессирующего и плоскопараллельного типа. Представлены результаты производственных испытаний промышленных образцов вибросмесителей. Большое внимание уделено измерению уровня вибрации, отражающие качество динамической балансировки виброактиватора. Величина вибрационного воздействия на окружающую среду и обслуживающий персонал, составляет 5 м/с<sup>2</sup>, что соответствует нормативным значениям для технологического оборудования по ГОСТ 22061-76.

### Ключевые слова

Чашечный смеситель, виброактиватор, методы проектирования, динамическая балансировка.

### Введение

Изготовление разнообразных строительных изделий (бетонных плит, блоков, кирпичей, тротуарной плитки и т.п.) неразрывно связано с приготовлением смесей, из которых они формируются. Качество смеси, характеризующее степень приближения ее к материалу с некоторым идеальным порядком распределения отдельных компонентов и

однородностью физико-химических свойств, в основном определяется эффективностью и интенсивностью процесса смешивания. Последнее является производной от конструктивных особенностей смесительного оборудования.

Процесс смешивания материалов представляет собой механический процесс, в результате которого компоненты минеральных компонентов и вяжущее равномерно распределяются в смешиваемом объеме, образуя однородную смесь.

На основе развитых представлений различают следующие виды смешивания:

1) конвективное - перемещение групп частиц из одного положения в другое переносом, внедрением, скольжением слоев, деформацией и истиранием порции слоя в результате механического движения рабочих органов смесителей;

2) диффузионное - постепенное перераспределение частиц различных компонентов через границу раздела фаз.

Конвективное смешивание относится к процессам макросмешивания, а диффузионное - микросмешивания. Одновременно с процессом смешивания в смесителе идет процесс сепарации - разделение частиц компонентов и сосредоточение их в отдельных местах корпуса смесителя под действием гравитационных, центробежных и инерционных сил.

Реальный процесс смесеобразования обычно заключается в наложении процессов смешивания и сепарации.

При перемешивании в смесителях различных типов структура смеси непрерывно изменяется и, следовательно, меняются ее структурно-реологические свойства. Управление структурно-реологическими свойствами является основным направлением интенсификации диффузионной составляющей процессов смешивания. В настоящее время нашли применения следующие способы: псевдооживление, использование поверхностно-активных веществ (ПАВ), обеспечивающие уменьшение вязкости смесей; подача вяжущего посредством форсунок и многие другие.

Одним из широко применяемых видов механических воздействий на среды в областях строительства и производства строительных материалов, существенно влияющие на изменение реологических свойств смесей, является вибрация (Бауман, Быховский, 1977; Блехман, 1994; Верстов и др., 2013; Челомей, 1981; Ефремов, Лобанов, 2008; Ефремов, Лобанов, 2009; Кузьмичев, 2013; Кузьмичев, 2014).

### Описание конструкций

Ниже представлены конструкции чашечных (роторных) смесителей (в дальнейшем вибросмесители), в которых внутри камеры смешивания размещен виброактиватор. Устанавливать виброактиватор целесообразно в «мертвых» зонах, расположенных вдоль геометрической оси камеры смешивания, где интенсивность процесса конвективного смешивания мала.

Основными конструктивными элементами смесителей являются камера смешивания, перемешивающий орган, виброактиватор, приводы перемешивающего органа и виброактиватора. Выгрузное отверстие в вибросмесителях целесообразно располагать в днище камеры смешивания вдоль вертикальной оси симметрии, что обеспечивало эффективную вибрационную обработку всего объема смеси в процессе выгрузки.

Процесс смешивания в подобных смесителях осуществляется путем сочетания вращения перемешивающего органа и воздействия на смесь виброактиватора, обеспечивающего интенсификацию тиксотропных превращений.

Были спроектированы промышленные образцы вибрационных смесительных машин, эксплуатирующихся в течение ряда лет, фотографии которых представлены на рисунке 1 и 2.

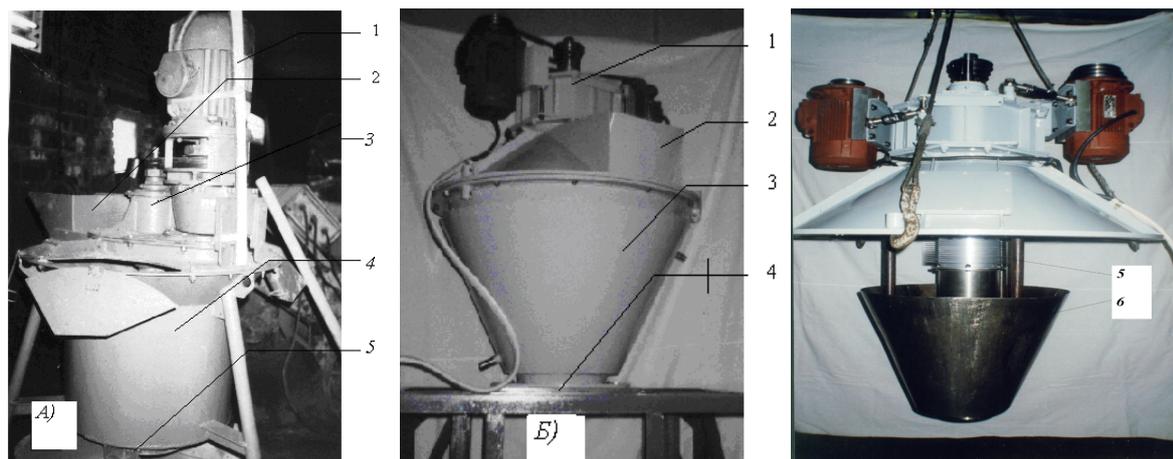


Рисунок 1. Вибросмеситель циклического действия:  
1-привод; 2-окно загрузки;  
3 виброактиватор прецессирующего типа;  
4-камера смешивания;  
5- окно выгрузки.  
а.с. 2033324 Кл. В 01F 11/00

Рисунок 2. Вибросмеситель циклического действия:  
1. привод; 2. окно загрузки; 3. камера смешивания; 4. окно выгрузки;  
5. виброактиватор плоскопараллельного типа;  
6. перемешивающее устройство  
Патент на изобретение №2510873 Кл. В 01F 11/00

Таблица 1. Техническая характеристика вибросмесителей периодического действия

Тип	A	B
Объем готового замеса, м <sup>3</sup>	0.08	0.1
<b>Параметры вибрации вибровозбудителя:</b> - максимальная амплитуда колебаний, мм - частота колебаний, рад/с - максимальное ускорение колебаний, м/с <sup>2</sup> - характер колебаний	3.5 230 185 прецессирующий	2.0 260 135 плоскопараллельный
<b>Частота вращения:</b> - спиральных лопастей, рад/с - усеченного конуса, рад/с	1.5	15
<b>Геометрические параметры:</b> <b>1. вибровозбудителя</b> - диаметр, мм - длина, мм <b>2. камеры смешивания:</b> - диаметр, мм - высота, мм - Установленная мощность эл/двигателя, кВт	130 500 600 570 5.5	160 570 730 700 3.0
Габариты: - ширина, м - высота, м - длина, м - масса, кг	1.5 1.9 1.5 650	1.0 2.3 1.0 730

На рисунке 3б,в представлено технологическое оборудование для производства камней из грунтобетонных смесей (безобжиговый кирпич) производительностью 40 шт/час. В качестве смесительного оборудования использовался вибросмеситель, представленный на рисунке 1.

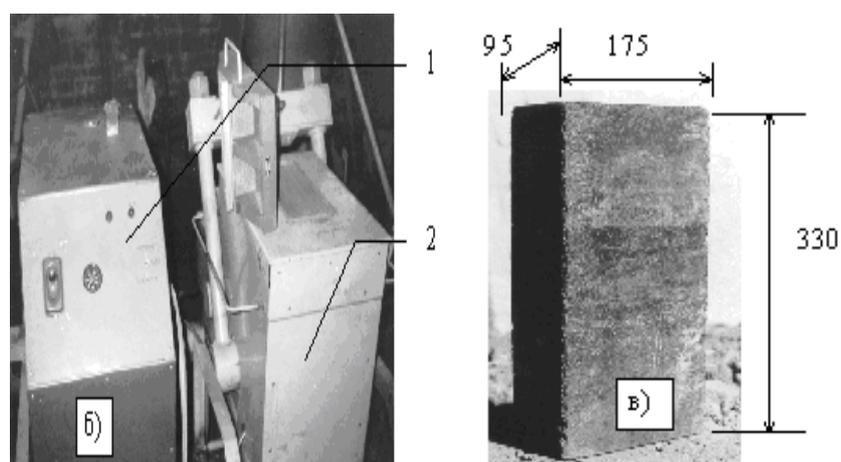


Рисунок 3. Технологическое оборудование: б) 1 – пульт управления; 2 – пресс УПГ-120; в) кирпич

Ниже представлены результаты исследования процесса смешивания в вибросмесителе (тип Б), предназначенного для смешивания высококонцентрированных мелкодисперсных смесей. В камере смешивания размещены плоскопараллельный виброактиватор и перемешивающий орган в виде усеченного конуса, сочетание которых обеспечивает повышенную интенсивность процесса смешивания. В качестве моделей использовались смеси, состоящие из глины и воды вязкостью 150 Па·с, мела и воды вязкостью 90 Па·с, а также пищевые составы из муки, порошка какао и воды вязкостью 270 Па·с.

Углубленное изучение процесса смешивания на микроуровне производилось на смеси, состоящей из мела и воды, в которую в качестве трассера (индикатора) добавляли нерастворимый черный порошок. Результаты микроскопического анализа сравнения качества смешивания без вибрации и с вибрацией представлены на рисунке Ц4.

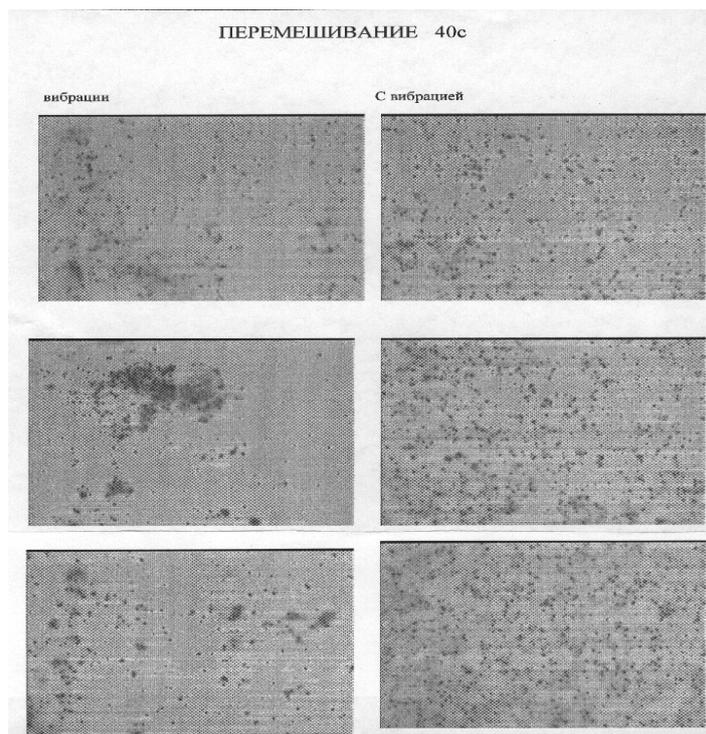


Рисунок 4 . Результаты микроскопического анализа процесса смешивания: без вибрации и с вибрацией

Очевидно, что вибросмешивание обеспечивает более однородное качество смеси, характеризующееся равномерным распределением зерен черного порошка в пробе.

#### Методика балансировки виброактиваторов

Рассмотрим расчет консольного прецессирующего трехпорного виброактиватора, представленного на рисунке 5, и установленного в вибросмесителе (тип А). Виброактиватор состоит из несущего приводного вала 1, коренных подшипников 2, корпуса 3, шатунного подшипника 4, установленного на эксцентриковую втулку с конструктивно заданным эксцентриситетом  $e$ , противовесов 5, муфты 6, расположенной концентрично относительно несущего приводного вала.

При вращении несущего приводного вала корпус виброактиватора совершает прецессирующее движение с частотой вращения вала и с углом нутаций:

$$\beta = \arctg e/L$$

В соответствии с методикой расчета, подробно описанной в (Кузьмичев, 2013; Кузьмичев, 2014; Кузьмичев, Верстов, 2017), равнодействующая центробежных сил и точка ее приложения (расстояние  $L$ ) определяются с учетом выражений:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_4 + Q_5 + Q_6 = \omega^2 g \beta \left( \frac{1}{2} q_1 l_1^2 + \frac{1}{2} q_2 [(l_1 + l_2)^2 - l_1^2] + M_4 l_4 + M_5 l_5 + M_6 l_6 \right)$$

$$L = \frac{Q_1 l_1 + Q_2 l_2 + Q_4 l_4 + Q_5 l_5 + Q_6 l_6}{Q} = \frac{\omega^2 g \beta \left( \frac{1}{3} q_1 l_1^3 + \frac{1}{3} q_2 [(l_1 + l_2)^3 - l_1^3] + M_4 l_4^2 + M_5 l_5^2 + M_6 l_6^2 \right)}{Q}$$

Динамическая балансировка осуществляется в соответствии с расчетной схемой, представленной на рисунке 6.

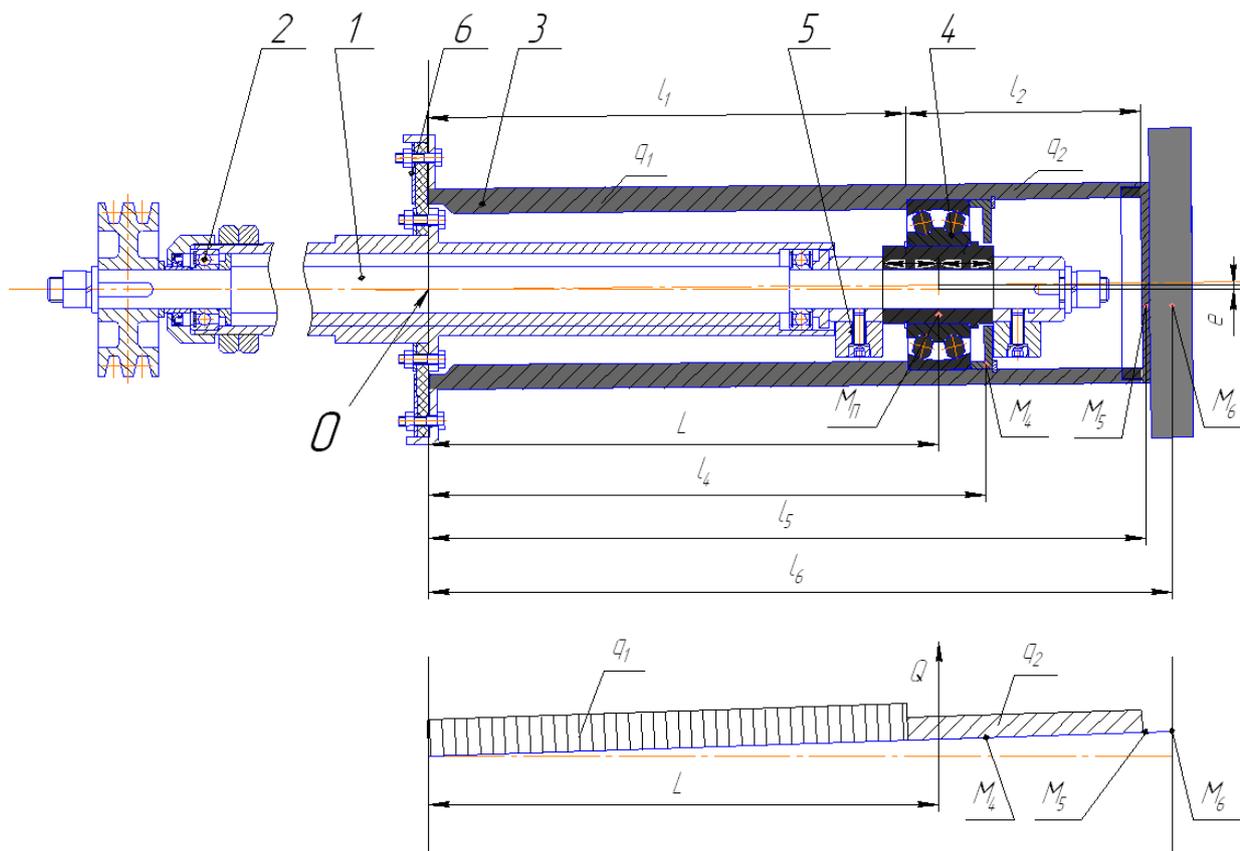


Рисунок 5. Расчетная схема

На рисунке 6 – соответственно центробежные силы, возникающие в результате колебаний узла шатунного подшипника и вращения противовесов.

Проектируется узел шатунного подшипника и определяется его масса  $m_{под}$  и положение центра тяжести. Конструкция вибровозбудителя выполняется с одним шатунным подшипником, центр тяжести которого устанавливается в точке приложения равнодействующей центробежных сил.

Масса узла подшипника включает подшипник, эксцентриковую часть втулки и крышку. Центробежная сила от массы узла шатунного определяется по формуле:

$$R = m_{под} \cdot e \cdot \omega^2$$

Условие балансировки  $P = 1/2 (Q+R)$ .

Рассмотрим расчет консольного плоскопараллельного четырехопорного виброактиватора, представленного на рисунке 7, и установленного в вибросмесителе (тип Б). Он состоит из несущего приводного вала 1, коренных подшипников 2, корпуса 3, шатунных подшипников 4, установленных на эксцентриковых втулках с конструктивно заданным эксцентриситетом  $e$ , противовесов 5, масляного насоса 6, муфты 7 и радиатора 8.

При вращении несущего приводного вала корпус виброактиватора совершает круговые колебания с постоянной амплитудой (эксцентриситетом  $e$ ).

Расчет центробежной силы и точки ее приложения производится следующим образом:

- известными методами определяется неуравновешенная масса  $m$  виброактиватора и положение ее центра тяжести - расстояние  $L$  от торца корпуса с использованием программы КОМПАС 3D и др.;
- равнодействующая центробежной силы рассчитывается по формуле:  $Q = m e \omega^2$ , где  $e$  – величина эксцентриситета кривошипа (амплитуда колебаний);  $\omega$  – угловая скорость вращения приводного коленчатого вала виброактиватора;
- посредством уравнений статики определяются реактивные силы  $R_1$  и  $R_2$  в шатунных подшипниках;
- определяются центробежные силы от масс узлов шатунных подшипников, включающих сам подшипник и эксцентриковую втулку.

Динамическая балансировка осуществляется в соответствии с расчетной схемой, представленной на рисунке.8.

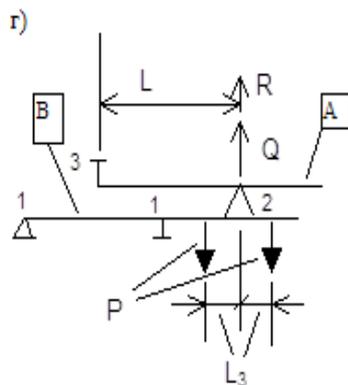


Рисунок 6. Расчетная схема

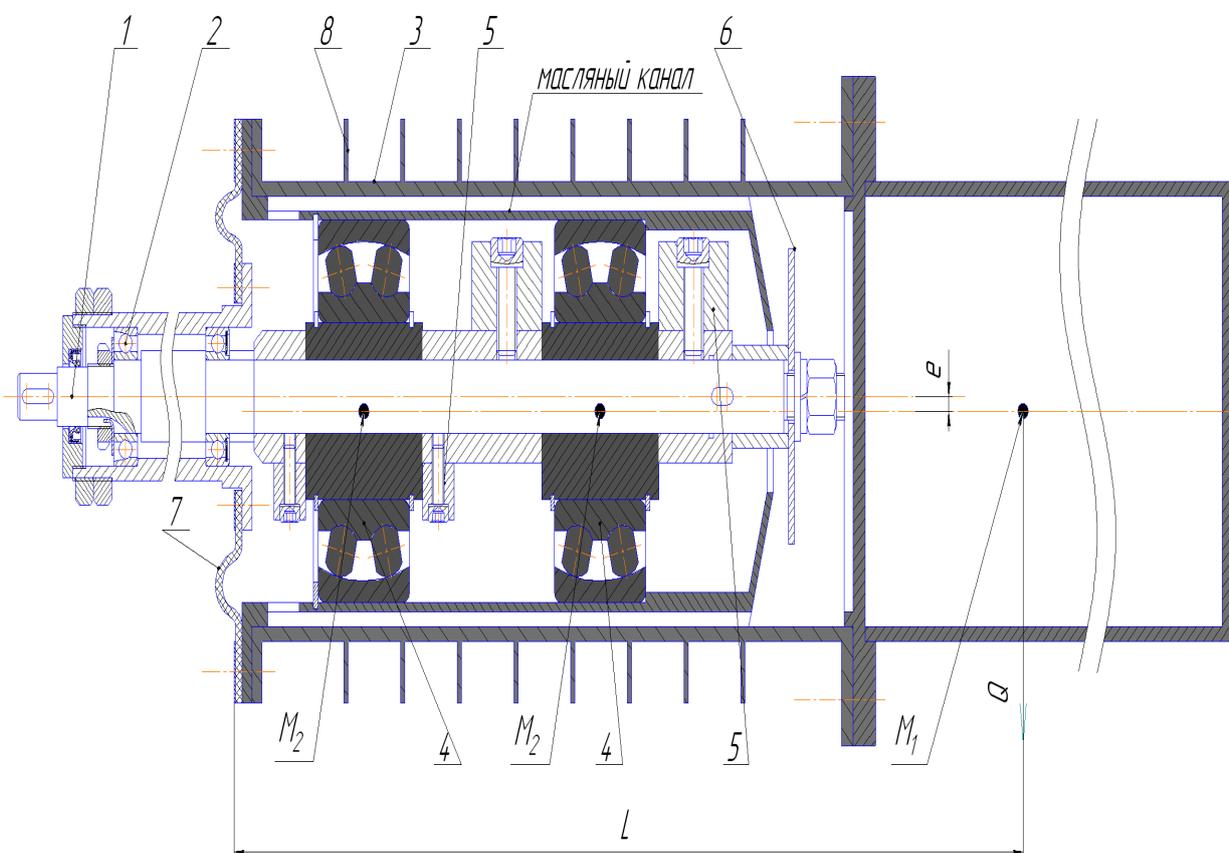


Рисунок 7. Консольный плоскопараллельный четырехопорный виброактиватор

Условие балансировки:

$$P_1 = 1/2 (R_1 - R_3),$$

$$P_2 = 1/2 (R_2 + R_4)$$

симметричное расположение  
противовесов

Геометрическая форма противовесов выбирается по рекомендациям, предложенным в статье (Kuzmichev, Verstov, 2017).

В качестве примера в таблице 2 представлены результаты измерений уровня вибрации корпуса вибросмесителя (тип А), отражающие качество динамической балансировки, которые проводились с использованием измерительной аппаратуры: виброметр тип 00032, № 4106, изготовитель Германия.

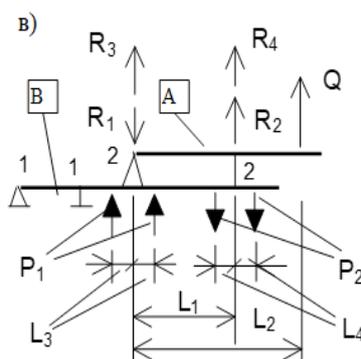


Рисунок 8. Расчетная схема

Таблица 2.

№ опыта	Ускорение колебаний вибровозбудителя $V$ , $m/c^2$	№ позиции установки датчика	Ускорение по X, $m/c^2$	Ускорение по Y, $m/c^2$	Ускорение по Z, $m/c^2$	средне-квадратичное значение $U = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$	$\frac{V}{U}$
			измеренное				
1.	185	№ 1	2,6	2,8	2,7	4,6	40
		№ 2	2,5	2,7	3,0	4,7	39
2.	185	№ 1	3,1	2,9	2,7	5,0	37
		№ 2	3,2	2,8	2,9	5,2	36

Анализ результатов измерений показывает, что применение уравновешенных эксцентриковых виброактиваторов обеспечивает снижение уровня вибрации, передаваемого на окружающую среду (привод, раму и т.п.), в ~ 35 раз. Измеренные амплитудные значения ускорения составляют ~  $5 m/c^2$ , что соответствует нормативным значениям для технологического оборудования по ГОСТ 22061-76.

### Выводы

Представленные материалы подтверждают правомерность методики балансировки виброактиваторов, подробно представленной в (Кузьмичев, 2014), и целесообразность их применения в смесительном оборудовании для производства строительных смесей.

Следует отметить, что многочисленные исследования в области интенсификации технологических процессов с применением вибрации, проведенные российскими учеными, показали, что основные положения физико-химической механики дисперсных систем могут быть успешно использованы и в процессах смешивания. Управление структурно-реологическими свойствами смесей на стадии перемешивания, в частности разрушение структуры смешиваемых материалов и, как следствие, уменьшение вязкости, позволяет повысить однородность смешиваемых материалов, качество продукции, влиять на процессы формирования и т.п..

Чашечные вибросмесители целесообразно использовать для смешивания высококонцентрированных дисперсных систем, например, шпатлевок, сухих смесей, порошков, красок и т.п..

### Литература

Бауман, В.А., Быховский, И.И. (1977). *Вибрационные машины и процессы в строительстве*. Москва: Высшая школа, с. 256.

Блехман, И.И. (1994). *Вибрационная механика*. Москва: Физматлит, с. 400.

Bosch, H.R.B., Hamersma, H.A., Els, P.S. (2016). Parameterisation, validation and implementation of an all-terrain SUV FTire tyre model. *Journal of Terramechanics*, 67, pp. 11–23. DOI: 10.1016/j.jterra.2016.06.001

Верстов, В.В., Тишкин, Д.Д., Романовский, В.Н. (2013). Совершенствование технологии бесподкладочного монтажа промышленного оборудования. *Монтажные и специальные работы в строительстве*, 7, с. 27–31.

Челомей, В.Н. (1981). *Вибрация в технике*. Справочник в 6 томах, том 6. Москва: Машиностроение, с. 456.

Ефремов, И.М., (2008). Новые роторные смесители с различными системами вибровозбуждения. *Строительные и дорожные машины*, 9, с. 7–9.

Ефремов, И.М., Лобанов, Д.В. (2009). Вибробетоносмесители: путь длиной в 70 лет. *Строительные и дорожные машины*, 10, с. 15–19.

Кузьмичев, В.А. (2014). *Основы проектирования вибрационного оборудования*. СПб: Издательство «Лань», с.208.

Кузьмичев, В.А. (2013). *Основы проектирования вибромиксеров*. Издательство: LAP LAMBERT Academic Publishing, с. 136.

Kuzmichev, V., Verstov, V. (2017). Vibration activators in the construction production technology. *Architecture and Engineering*, 2(1), pp. 24–32. DOI: 10.23968/2500-0055-2017-2-1-41-50

Zhang, K.S., Zhu, M., Tang, W.Y., Ou, W.H., Jiang, X.Q. (2016). Algorithm for reconstructing vibrational relaxation times in excitable gases by two-frequency acoustic measurements. *Acta Physica Sinica*, 65 (13): 134302. DOI: 10.7498/aps.65.134302

## О РАСЧЕТЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СПЛОШНОСТЕНЧАТЫХ АРОК ПО ИЗГИБНО-КРУТИЛЬНОЙ ФОРМЕ

Дмитрий Уразгильдеев<sup>1</sup>, Григорий Белый<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-ая Красноармейская ул., д.4

urazgildeev.dmitry@yandex.ru<sup>1</sup>

### Аннотация

В работе произведен обзор основных, наиболее значимых научных трудов по исследованию устойчивости стержней с криволинейной осью, поднимается вопрос проработанности рассматриваемой тематики. Предложена методика по определению пространственных перемещений криволинейных стержней при упругой работе материала. Приведен алгоритм по оценке устойчивости по изгибно-крутильной форме стержневого элемента с криволинейной осью по критерию фибровой текучести. В качестве иллюстрации методики приведен пример подбора сечения стальной арки.

### Ключевые слова

Устойчивость, сплошностенчатая стальная арка, стержень с криволинейной осью, тонкостенный стержень.

### Введение

Стальные арки для несущих конструкций покрытий появились в 40-50 гг. прошлого века. Кроме своей архитектурной выразительности арки имеют несомненное преимущество перед балочными и рамными конструкциями вследствие значительно меньших изгибающих моментов, возникающих в сечениях конструкции. Снижение момента в арках достигается за счет распора, который в каждом сечении конструкции создает момент, противоположный по знаку момента от внешних сил.

В связи с этим, основной расчетной величиной в арке становится неизгибающий момент, продольная сила. При проектировании металлических арок, определяющим фактором при оценке работоспособности конструкции является не способность сопротивляться изгибу, а способность сохранять форму оси (устойчивость). Потеря устойчивости криволинейного стержня имеет более сложный характер, чем потеря устойчивости прямолинейного стержня.

### Состояние вопроса

Исследованиями устойчивости прямолинейных и криволинейных стержней открытого профиля занимались многие ученые. Одним из первых, кто рассмотрел задачу устойчивости стержня с криволинейной осью, был Тимошенко С.П. В своей работе (1971) он привел вывод дифференциального уравнения устойчивости плоской формы изгиба стержней с криволинейной осью. Необходимо также отметить вклад Власова В.З. в исследование данной темы. Он разработал техническую теорию расчета тонкостенных стержней открытого профиля, которая легла в основу многих научных трудов связанных с напряженно-деформированным состоянием тонкостенных стержней. В своей работе Власов (1959) рассмотрел различные частные задачи, связанные с устойчивостью тонкостенных круговых стержней, арок, торообразных оболочек. Следует выделить труды Уманского А.А., в которых автор развил теорию стержней замкнутого профиля.

Деформационная теория расчета тонкостенных стержней Власова получила развитие в трудах Броуде Б.М., Воробева Л.Н. и была обобщена Бейлиным Е.А.

Говоря о расчете по деформированной схеме тонкостенного криволинейного стержня, следует отметить работы Бейлина Е.А. (1970, 1997), а также Белого Г.И. (1973), который в своем научном труде рассмотрел ряд частных задач, связанных с работой криволинейных стержней в условиях различных нагрузок и граничных условий.

### Актуальные вопросы исследования

Использование арочных конструкций в зданиях с большими пролетами позволяет значительно снизить расход стали. Однако, широкое их внедрение сдерживается отсутствием в отечественных нормах проектирования указаний по расчету на устойчивость, а имеющиеся в этой области исследования не позволяют построить инженерную методику расчета. Поэтому, в настоящее время одним из актуальных направлений исследования является изучение пространственной устойчивости криволинейных стержней с целью получения инженерной методики расчета сплошностенчатых арок.

### Алгоритм деформационного расчета на устойчивость стержневого элемента арки по изгибно-крутильной форме

Рассмотрим задачу об устойчивости плоской формы изгиба тонкостенного стержневого элемента, выделенного из сплошностенчатой арки (рисунок 1). Рассматриваемый фрагмент располагается между точками раскрепления арки из плоскости – между прогонами. Длину стержневого элемента принимаем равной его геометрической длине. Элемент загружен продольной силой  $F$ , приложенной с эксцентриситетами относительно обеих осей симметрии  $e_x$ ,  $e_y$  как показано на рисунке 2а. Концы арки шарнирно закреплены в плоскости и из плоскости начальной кривизны; закручивание концов арки отсутствует.

Выделенный стержневой элемент симметричного сечения шарнирно закреплен в плоскости и из плоскости начальной кривизны; закручивание концевых сечений отсутствует.

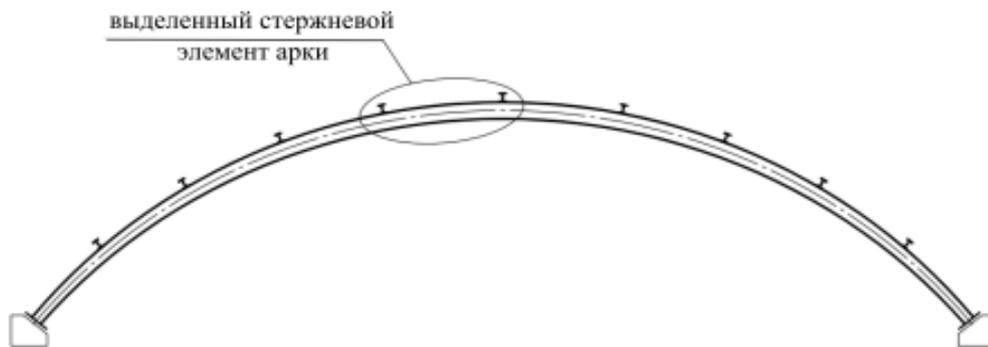


Рисунок 1. Выделение стержневого элемента из конструкции

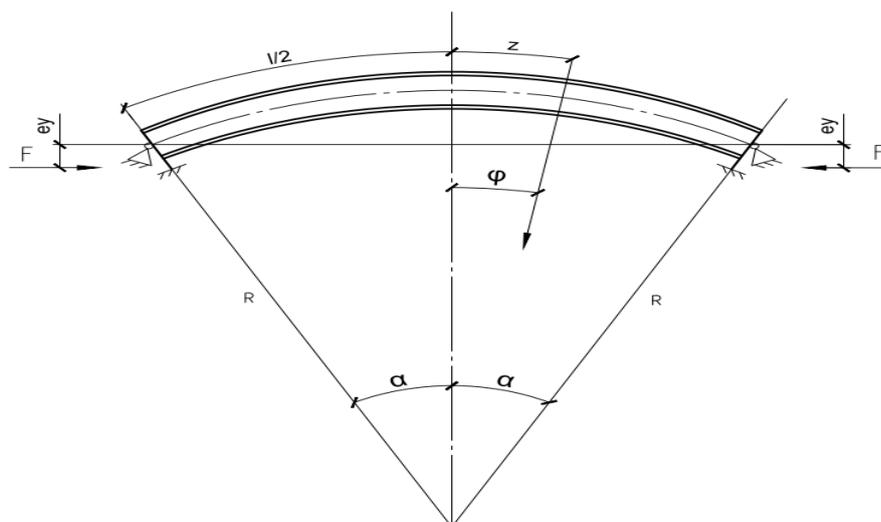


Рисунок 2. Расчетная схема элемента

Для решения поставленной задачи используем систему деформационных уравнений равновесия Е.А. Бейлина для криволинейных стержней (Бейлин, 1997). При принятых условиях закрепления и формы сечения в дифференциальные уравнения равновесия стержня примут вид:

$$\begin{cases} E J_y X_y'' - X_y N - X_z' M_x - 2 X_z M_x' + \frac{1}{R} (G J_k X_z' - E J_\omega X_z''') = 0 \\ E J_\omega X_z''' - G J_k X_z' - X_y (M_x - \frac{E J_y}{R}) - i_p^2 (X_z N)' = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где  $X_y$  и  $X_z$  – неизвестные функции компонентов перемещения оси криволинейного стержня, которые находятся по формулам:

$$X_y = -v'' + \frac{\theta}{R}; X_z = \theta' + \frac{v'}{R} \quad (2)$$

$E$ ,  $G$  – модули линейной и сдвиговой деформации;  $J_y$  и  $J_\omega$  – главные осевые и секториальные моменты инерции сечения;  $J_k$  – момент инерции чистого кручения;  $i_p$  – полярный радиус инерции,  $v$  – боковое смещение оси стержня,  $\theta$  – угол закручивания стержня.

Значение силовых фактор, действующих по длине стержня с учетом кривизны стержня принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} M_x &= F R (\cos \varphi - \cos \alpha) + F e_y \\ M_y &= F E_x \cos \varphi \\ N &= F \cos \varphi \\ M_z &= F e_x \sin \varphi \end{aligned} \quad (3)$$

Для решения системы (1) воспользуемся аналитически-численным методом, в котором общее решение задачи при упругой работе материала представляется в виде комбинации частных решений:

$$\chi_y = \chi_{y, str} + \chi_{y, st}; \chi_z = \chi_{z, str} + \chi_{z, st} \quad (4)$$

Первые слагаемые являются решениями уравнений, составленных недеформированной расчетной схеме:

$$E J_y \chi_{y, str} = M_y; G J_k \chi_{z, str} - E J_\omega \chi_{z, str}'' = M_z \quad (5)$$

Подставляем значения силовых факторов (3) в уравнения (5) и получаем:

$$\begin{aligned} E J_y \chi_{y, str} &= F e_x \cos \varphi; \\ G J_k \chi_{z, str} - E J_\omega \chi_{z, str}'' &= F e_x \sin \varphi \end{aligned} \quad (6)$$

Преобразовывая уравнения (6):

$$\begin{aligned} \chi_{y, str} &= \frac{F \cdot e_x}{E J_y} \cos \varphi; \\ -\chi_{z, str}'' + \frac{G J_k}{E J_\omega} \chi_{z, str} &= \frac{F e_x}{E J_\omega} \sin \varphi \end{aligned} \quad (7)$$

Решая заданные уравнения (7) получаем:

$$\chi_{y, str} = \frac{F \cdot e_x}{E J_y} \cos \varphi;$$

$$\chi_{z, str} = \frac{F \cdot e_x \cdot R^2}{E J_\omega} \left( \frac{\sin \varphi}{(k^2 R^2 + 1)} - s h(k z) \cdot \right.$$

$$\left. \cdot \frac{\cos \alpha}{k \cdot c h\left(\frac{k l}{2}\right)} \left( \frac{e_y}{R^2} + \frac{1}{(k^2 R^2 + 1)R} \right) \right)$$

(8)

$$\text{where } k = \frac{G J_k}{E J_\omega}; \quad \varphi = \frac{z}{R}$$

Вторые слагаемые в (3) являются функциями потери устойчивости и вытекают из решения бифуркационных задач устойчивости. При заданной расчетной схеме функции потери устойчивости примут следующий вид:

$$\chi_{y, st} = \chi_{y, st} \cos \frac{\pi z}{l}; \quad \chi_{z, st} = \chi_{z, st} \sin \frac{\pi z}{l}$$

(9)

Где  $\cos(\pi z/l)$  и  $\sin(\pi z/l)$  – формы потери устойчивости, а  $\chi_{y, st}$ ,  $\chi_{z, st}$  – некоторые неизвестные константы. Подставляем значение решений (4) с учетом (8) и (9) в (1) и получаем:

$$\begin{cases} L_y = E J_y \chi_{y, st}'' - (\chi_{y, st} + \chi_{y, str})N - (\chi'_{z, st} + \chi'_{z, str})M_x - \\ - 2(\chi_{z, st} + \chi_{z, str})M'_x + \frac{1}{R}(G J_k \chi'_{z, st} - E J_\omega \chi'''_{z, st}) \\ L_z = E J_\omega \chi_{z, st}''' - G J_k \chi'_{z, st} - (\chi_{y, st} + \chi_{y, str})M_x + \\ + \chi_{y, st} \frac{E J_y}{R} - i_p^2 [(\chi'_{z, st} + \chi'_{z, str})N + (\chi_{z, st} + \chi_{z, str})N'] = 0 \end{cases}$$

(10)

Для решения системы (10) примем алгоритм метода Бубнова-Галеркина:

$$\begin{cases} \int_0^{\frac{l}{2}} L_y \cos \frac{\pi z}{l} dz = 0 \\ \int_0^{\frac{l}{2}} L_z \sin \frac{\pi z}{l} dz = 0 \end{cases}$$

(11)

В результате получим системы двух алгебраических уравнений относительно неизвестных констант  $\chi_{y, st}$  и  $\chi_{z, st}$ , решив которую будем иметь все компоненты перемещений. Подставив значения  $\chi_{y, st}$  и  $\chi_{z, st}$  (2) и решив систему дифференциальных уравнений получим значения для  $u$  и  $\theta$  которые позволят перейти к деформационным усилиям:

$$M_y = M_y^0 + N^0 v + M_x^0 \theta; \quad B_\omega = -E J_\omega \theta''$$

(12)

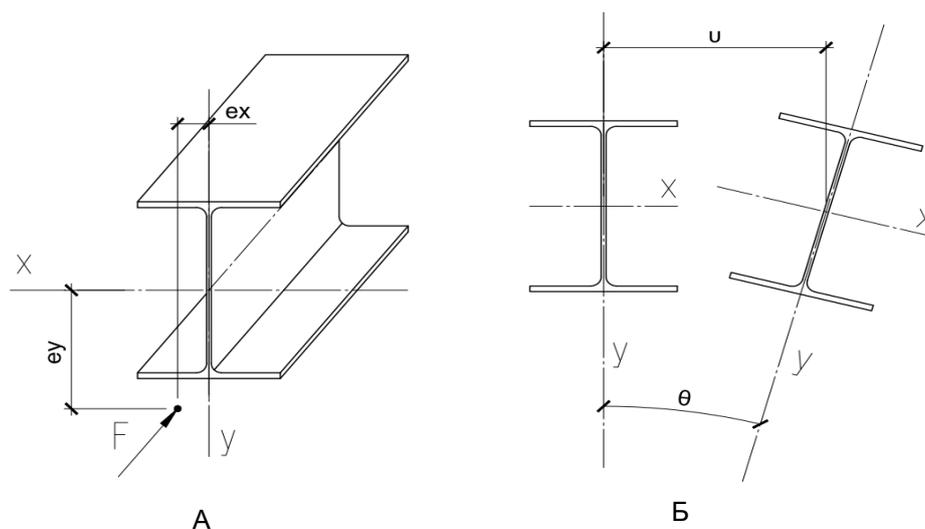


Рисунок 3.

а) схема загрузки; б) пространственные перемещения сечений

С учетом (12) запишем значения напряжений в среднем сечении стержне:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_x^0}{W_x} + \frac{M_y^0 + N^0 v + M_x^0 \theta}{W_y} + \frac{B_\omega}{W_\omega} \leq R_y \quad (13)$$

Делим обе части уравнения (13) на  $R_y$  и выносим за скобку  $N/AR_y$ .  
После ряда преобразований уравнение (13) приобретает вид:

$$\frac{N}{A R_y} \left( 1 + m_x^0 + m_y^0 + \frac{v(0)}{\rho_y} + \frac{e_y \theta(0)}{\rho_y} + \frac{B_\omega}{N \rho_\omega} \right) \leq 1 \quad (14)$$

Где  $m_x, m_y$  – относительные эксцентриситеты;  $\rho_y, \rho_\omega$  – радиусы ядра сечения.  
Полученное выражение позволяет определить критические значения нагрузки.

### Пример расчета

В качестве иллюстрации методики расчета приводится пример подбора сечения для стальной арки пролетом 36 м и со стрелой подъема 8.5 м, шаг прогонов – 5,0 м.

Предварительно принимаем сечение арки – двутавр 70Б0 по СТО АСЧМ 20-93, материал конструкции – сталь С245.

Устойчивость арки в плоскости считаем обеспеченной.

Выделим из арки стержневой элемент между прогонами длиной 5,0 м. При расчете конструкции в плоскости от действия постоянных и временных нагрузок были получены следующие крайевые усилия в выделенном фрагменте арки:

$$N = -100t; M_x = 24tm \quad (15)$$

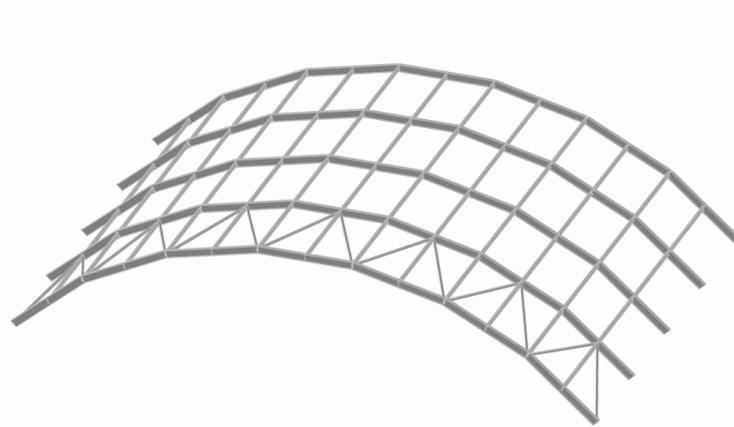


Рисунок 4. Фрагмент каркаса здания

Запишем значение эксцентриситета в плоскости арки, а также будем учитывать изгиб из плоскости арки в связи со случайным эксцентриситетом:

$$e_y = \frac{M_x^0}{N} = \frac{9.4t \text{ m}}{40t} = 0.235m = 23.5 \text{ cm} \quad (16)$$

$$e_{x,rand} = \frac{l_{efy}}{750} + \frac{i_y}{20} = \frac{317.5}{750} + \frac{4.5}{20} = 0.65 \text{ cm}$$

С учетом заданной расчетной схемы и полученных усилий воспользовавшись приведенным алгоритмом получаем следующие значения перемещений оси стержневого элемента арки в среднем сечении:

$$v(0) = 0.236 \text{ cm}; \theta(0) = 0.0013 \text{ (рад)} \quad (17)$$

где  $v$  – боковое смещение оси стержня,  $\theta$  – угол закручивания стержня

С учетом полученных перемещений запишем значения деформационных усилий  $M_y$  (момент из плоскости арки, вызванный наличием случайного эксцентриситета  $e_{x,rand}$ )  $B_w$ :

$$M_y = 0.92t \text{ m}; B_w = 0.13t \cdot \text{cm}^2 \quad (18)$$

В соответствии с формулой (14) определяем коэффициент использования сечения:

$$\frac{N}{AR_y} \left( 1 + m_x^0 + m_y^0 + \frac{v(0)}{\rho_y} + \frac{e_y \theta(0)}{\rho_y} + \frac{B_w}{N\rho_\omega} \right) = 0.978 \approx 1 \quad (19)$$

Коэффициент использования сечения, с учетом заданных нагрузок близок к единице, следовательно сечение подобрано верно.

Таким образом, приведенный алгоритм позволяет произвести оценку устойчивости по изгибно-крутильной форме стержней с круговой осью по критерию фибровой текучести.

## Литература

Аскинази, В.Ю. (2015). Пространственная устойчивость двутавровых стержней с переменной высотой стенки в упруго-пластической стадии. *Вестник гражданских инженеров*, 4(51), с.46–55.

Бейлин, Е.А. (1997). Статика и динамика тонкостенных криволинейных стержней произвольного профиля. *Известия вузов. Строительство*, 7, с.19–26.

Бейлин, Е.А. (1970). К теории деформационного расчета и устойчивости криволинейных и прямолинейных тонкостенных стержней. *Механика стержневых систем и сплошных сред*, 63, с.5–19.

Белый, Г. И. (1973). *Некоторые вопросы деформационного расчета и устойчивости тонкостенных стержней с плоской криволинейной осью*. Дис. Канд. Техн. Наук. Ленинград: ЛИСИ, с.130.

Белый, Г. И. (1987). *Пространственная работа и предельные состояния стержневых элементов металлических конструкций*. Дис. Док. Техн. Наук. Ленинград: ЛИСИ, с.464.

Власов, В. З. (1959). *Тонкостенные упругие стержни*. Москва: Физматгиз, с.568.

Колоколов, С. Б. (2010). Исследование процесса деформирования арочной конструкции как способ оценки ее устойчивости. *Вестник Оренбургского гос. ун-та*, 2(108), с. 150–153.

Колоколов, С.Б. (2014). Исследование устойчивости стальной параболической арки деформационным методом. *В материалах междунаро. научно-техн. конференции «Строительная наука – 2014: теория, образование, практика, инновации (посвящается 55-летию ИСиА САФУ)»*. Архангельск: Изд-во ООО «Типография ТОЧКА», с. 213–217.

Колоколов, С. Б. (2015). Методика подбора сечения стальной арки при помощи деформационного расчета. *Вестник Оренбургского гос. ун-та*, 5(180), с.151–154.

Кузнецов, А. Ю. (2013). *Прочность и пространственная устойчивость составных стержневых элементов конструкций из холодногнутых профилей*. Дис. Канд. Техн. Наук. СПб: СПбГАСУ, с.142.

Тимошенко, С. П. (1971). *Устойчивость стержней, пластин и оболочек*. Москва: «Наука», с.808.

## ТЕХНОЛОГИЯ ЗИМНЕГО БЕТОНИРОВАНИЯ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГРЕЮЩЕГО ПРОВОДА

Антонина Юдина<sup>1</sup>, Рафаэль Оганян<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-ая Красноармейская ул., д.4

yudinaantonina2017@mail.ru<sup>1</sup>

### Аннотация

В настоящее время остро стоит проблема бетонирования конструкций при отрицательных температурах. Одним из методов зимнего бетонирования является электропрогрев конструкций с помощью греющего провода. В статье представлен анализ существующих исследований технологии прогрева бетона электрическим проводом при зимнем бетонировании, определены критерии выбора оборудования и материалов для осуществления прогрева, разработаны организационно-технологические схемы зимнего бетонирования конструкций с применением обогрева бетона электрическим проводом.

Даны рекомендации по выбору нагревательных элементов и схем подключения, исходя из требований усовершенствования производства работ, оптимизации и рационального использования трудовых и материальных ресурсов, снижения времени дополнительных работ. В рамках работы произведена оценка рисков, сопутствующих технологии зимнего бетонирования с использованием греющего провода.

### Ключевые слова

Зимнее бетонирование, электропрогрев, греющий провод, параметры прогрева.

### Введение

Сегодня в России наблюдается высокий темп строительства. Большую часть отрасли занимает возведение зданий из монолитного железобетона. Данный метод строительства является довольно популярным ввиду высокого качества и долговечности строительной продукции.

Процесс получения конструкций из железобетона состоит из армирования, установки опалубки и бетонирования. Наиболее предпочтительно производить бетонирование в теплое время года. Тем не менее, принимая во внимание географическое положение России и особенности климата, возникает необходимость производства бетонных работ при отрицательных температурах.

Бетонирование зимой требует соблюдения ряда мероприятий, обеспечивающих организационные и технологические аспекты по созданию условий для набора бетоном прочности при отрицательной температуре.

Актуальность работы обусловлена географическим положением и климатическими условиями России. Научные исследования по зимнему бетонированию активно велись в СССР, также имеются многочисленные публикации современных российских ученых. Советскими учеными были разработаны всевозможные способы зимнего бетонирования. Огромный вклад в изучение этой области строительства внесли Б. А. Крылов, С. А. Миронов, А. С. Арбеньев, Л. М. Колчеданцев, А. В. Лагойда, И. Б. Заседателев. Заслуга именно советских ученых подтверждается многочисленными статьями в зарубежных изданиях и признанием на международных собраниях.

Тем не менее, принимая во внимание многочисленные фундаментальные исследования по зимнему бетонированию, остаются нерассмотренными множество аспектов данной отрасли.

Говоря более детально, пока не существует единого способа выбора метода зимнего бетонирования, нет принципа определения действительной прочности бетона в проектном возрасте, существуют проблемы с измерением температуры, определением длительности необходимого прогрева бетонной смеси.

### Предмет, задачи и методы

Предметом исследования данной статьи является способ бетонирования при отрицательных температурах с применением греющего провода.

Основными задачами исследований являются: изучение технологии производства бетонных работ в зимнее время; анализ существующих исследований по данному направлению; разработка типовой схемы технической реализации бетонирования конструкций с электропрогревом проводом ПНСВ при отрицательных температурах.

Методы, применяемые в статье, основаны на анализе фундаментальных основ в данной области, исследованиях советских и российских ученых. В качестве теоретической основы взяты научные публикации по тематике зимнего бетонирования и изучению процессов, происходящих в бетоне под воздействием различных температур.

После затворения цемента водой начинается процесс гидратации. Гидратация цемента – это химический процесс, основанный на присоединении воды клинкерными составляющими цемента с образованием новых частиц. Первоначально, при затворении цемента водой получается цементный раствор, который постепенно загустевая и, схватываясь, переходит в твердое состояние, набирая прочность и образуя цементный камень. Реакция гидратации происходит с выделением тепла.

Тепловыделение цемента при твердении бетона имеет как положительные, так и отрицательные стороны. Непосредственно для зимнего бетонирования источник тепла внутри бетона является положительным фактором. Это позволяет сэкономить ресурсы при прогреве бетона. В массивных конструкциях прогрев бетона при отрицательных температурах может не выполняться, так как экзотермической реакции твердения и укрытия утеплителем достаточно для поддержания нормальной температуры твердения. В тонкостенных элементах с большим модулем поверхности охлаждения подвод внешнего тепла обязателен для зимнего бетонирования. Вместе с тем, стоит задача увеличения количества тепла, выделяемого бетоном при твердении. С этой целью в зимнем бетоне увеличивают содержание цемента с 200 до 400 кг/м<sup>3</sup>. Это позволяет уменьшить мощность прогрева и соответственно затраты на зимнее бетонирование.

Проблема затрат электроэнергии остро стоит перед строителями. Зимнее бетонирование в современных условиях требует быстрого, качественного прогрева конструкций с минимальной трудоемкостью и малыми финансовыми вложениями. Метод зимнего бетонирования с применением греющего провода позволяет укладывать его в тело бетона и полностью использовать выделяемое тепло. Технология прогрева греющим проводом предусматривает применение проводов со стальными жилами в связи с тем, что сталь имеет большое электрическое сопротивление.

Основным вопросом является расчет параметров процесса электропрогрева. В настоящее время не существует нормативных документов, регламентирующих расчет и технологию прогрева бетона греющим проводом. При разработке технологических карт на зимнее бетонирование с применением греющих проводов инженеры имеют лишь методические рекомендации.

Выбор режима термообработки, обеспечение равномерности прогрева, расчет параметров греющего провода и шага укладки требуют более детального изучения. Анализ практики зимнего бетонирования показал, что в большинстве случаев прогрев бетона осуществляется без предварительного расчета, в лучшем случае, исходя из опыта бетонирования других конструкций, а инженерно-технический персонал в большинстве своем мало знаком с особенностями методики. Однако, климатические условия, толщина конструкций, мощность электроэнергии, материалы и оборудования везде различны, поэтому, режим термообработки следует корректировать для каждого конкретного случая.

Анализ режима термообработки основан на теоретических расчетах необходимого количества тепла, исчисляемого в кВт энергии. Все расчеты сводятся к математическим выражениям и работе с номограммами. В то же время вопросы прогрева бетона можно отнести к области теплотехники.

Определение оптимальных параметров режима термообработки важно при подготовке прогрева конструкции. Выбор площади сечения и длины провода, а также величина подаваемого напряжения производится подбором. Требуется установить оптимальные параметры, более экономичный вариант с точки зрения наименьшего расхода трудовых и материальных ресурсов.

Также проблемой в рассматриваемом вопросе является контроль температуры бетона. На строительных площадках контроль температуры прогрева иногда должным образом не осуществляется, либо вообще не производится. Возникает опасность закипания бетона при слишком интенсивном прогреве или, наоборот, недобор прочности при преждевременном отключении питания.

Метод зимнего бетонирования с применением греющего провода нуждается в оптимизации, совершенствовании и индивидуальном подходе в области организации и технологии для различных конструкций.

Метод электропрогрева основан на выделении тепла проводником с большим сопротивлением при прохождении через него электрического тока. В качестве нагревательного элемента используется провод ПНСВ. Данный провод состоит из стальной жилы в ПВХ оболочке. Стальные жилы изготавливаются с различными диаметрами, наиболее часто применяются в строительстве и присутствуют в продаже провода ПНСВ с диаметрами жил 1,2, 2,0, 3,0 мм. Чем больше диаметр, тем меньше удельное сопротивление

проводника. В технологии электропрогрева рекомендуется рассчитывать провод ПНСВ так, чтобы мощность тепловыделения была 30-35 Вт/м для армированных конструкций и 35-40 Вт/м для неармированного бетона. Мощность прогрева равна электрической мощности нагревательного элемента, так как вся электрическая энергия преобразуется в тепловую. Мощность прогрева рассчитывается по известной формуле:

$$P = \frac{U^2}{R}$$

где  $P$  – мощность прогрева (Вт);  $U$  – напряжение источника тока (В);  $R$  – сопротивление нагревательного элемента (Ом). Прогрев осуществляется с использованием трансформаторов или специальных станций прогрева бетона. Станции прогрева позволяют изменять выходное напряжение ступенями. При напряжении питания 220 В, на выходе можно получать напряжение в пределах 35-90 В. Понижение напряжения необходимо для обеспечения безопасности прогрева и уменьшения монтажной длины нагревательного элемента.

Расчет монтажной длины элемента согласно методике выполняется по формуле:

$$l = \sqrt{\frac{v^2 \cdot S}{\rho \cdot \rho_t}}$$

где  $l$  – длина проводника (м);  $S$  – площадь поперечного сечения жилы (мм<sup>2</sup>);  $\rho$  – оптимальная погонная нагрузка (Вт/м);  $\rho_t$  – удельное сопротивление жилы при рабочей температуре (Ом·мм<sup>2</sup>/м).

Следует отметить, что удельное сопротивление токопроводящей жилы изменяется при нагреве, соответственно, общее сопротивление жилы в процессе нагрева также изменяется. В расчете учитывается сопротивление провода при рабочей температуре прогрева и соответствующей ей погонной нагрузке на провод. Сопротивление жилы, приведенное к 1 погонному метру длины нагревателя при рабочей температуре, рассчитывается по формуле:

$$R_t = \frac{\rho_t}{S}$$

Получаем:

$$l = \sqrt{\frac{v^2}{\rho \cdot R_t}}$$

Напряжение тока в нагревательных элементах можно изменять путем переключения режимов прогрева на станциях прогрева бетона, а также изменением схем подключения проводов к ним. Существует 2 принципиальные схемы подключения: «треугольник» и «звезда».

В схеме подключения «треугольник» провода разделяются на 3 группы с одинаковым количеством проводов, провода в группе соединяются параллельно. Три набора проводов соединяют концами в 3 узла, а выводы от них подключают к выходным зажимам трансформаторной подстанции. Каждый провод, называемый «ниткой» в группе, находится под линейным выходным напряжением станции прогрева.

В схеме подключения «звезда» провода объединяются в «тройки», состоящие из 3 нагревателей одинаковой длины. Одним концом провода закрепляются в узел, вторые концы нагревателей подключаются к выходным зажимам станции прогрева. Каждый провод «тройки» находится под фазным напряжением трансформатора, которое меньше линейного в 1,73 раза.

Технология прогрева предусматривает использование провода ПНСВ, находящегося непосредственно внутри бетона. На воздухе провод ПНСВ перегорает, поэтому включение питания разрешается производить только после полной укладки бетонной смеси и отсутствия контакта проводов с воздушной средой.

При монтаже провода ПНСВ нагревательные элементы оснащаются «холодными концами» из провода АПВ-4. Использование данного провода позволяет фиксировать наличие тока по небольшому нагреву «холодных концов». Их выводы соединяют с проводами СИП, которые служат магистралями от трансформаторов до нагревателей.

Шаг нагревателей выбирается согласно расчетам. Как правило, расстояние между проводами ПНСВ выбирается из интервала 100-300 мм в один или два ряда по высоте. Часто шаг укладки выбирается кратным шагу армирования для удобства монтажа провода.

С целью упрощения работ и снижения трудоемкости рекомендуется укладывать провод одновременно с выполнением армирования. При армировании в два слоя укладку провода в конструкцию выполнять до монтажа второго слоя арматурных сеток и стержней. При производстве последующих арматурных работ избегать повреждения провода, не производить резку и сварку арматуры над проводом из-за риска повреждения изоляции и целостности нагревателей.

Схемы укладки проводов и длины отрезков принимаются для каждой конструкции индивидуально.

Таким образом:

- оптимальная длина нагревателя варьируется от 12 до 83 м, что дает широкий выбор схем подключения и оптимизации укладки провода в бетонируемую конструкцию;

- чем тоньше сечение провода, тем короче должна быть длина нагревателя для соблюдения требования по погонной нагрузке на провод. Выбор провода ПНСВ диаметром 1,2 мм должен быть обусловлен не только дешевизной товара (чем тоньше провод, тем дешевле), но и размерами конструкции.

- ПНСВ  $\varnothing 1,2$  мм оптимален для прогрева стен, так как монтажная длина провода ограничивается только высотой стены. Провод укладывается вдоль вертикальных стержней армирования стен несколькими петлями. Данный провод можно также использовать при прогреве сравнительно небольших по длине конструкций (16,5 м при подключении схемой «треугольник» и 19 м при подключении схемой «звезда»).

- провод ПНСВ диаметром 3 мм имеет наибольшую монтажную длину в связи с меньшим удельным сопротивлением провода. Данный тип провода можно порекомендовать в качестве нагревателя при большой площади обогреваемой конструкции. При крупных блоках бетонирования использование данного провода зачастую является единственным возможным решением, так как он позволяет перекрывать большие площади прогрева с одной точки подключения (41 м при подключении треугольником и 47 м при подключении звездой).

- в случае малогабаритных конструкций или небольших участков бетонируемых стен, перекрытий, колонн, балок, площадок большая монтажная длина провода ПНСВ  $\varnothing 3,0$  мм при той же мощности обуславливает увеличение числа петель и, соответственно, более равномерный обогрев бетона, однако, повышает трудоемкость укладки провода. Использование длинных нагревателей снижает количество выводов и монтажных кабелей, прокладываемых от нагревательных элементов до трансформаторных подстанций, и дает определенную экономию. При повреждении провода значительная площадь бетонируемой конструкции лишается прогрева, что может вызывать неравномерные деформации и/или промерзание бетона.

- провод ПНСВ  $\varnothing 2,0$  мм является промежуточным вариантом, сочетающим преимущества и недостатки проводов диаметром 1,2 и 3,0 мм.

- схема подключения «звезда» позволяет сократить в 1,73 раза длину проводника. Такую схему рекомендуется применять только при прогреве перекрытий в связи с особенностями подключения. В случаях, когда длина прогреваемой конструкции равна длине нагревателя не требуется устройства петель. Отсутствие петель снижает трудоемкость, однако использование коротких нагревателей увеличивает количество выводов и подключений концов к зажимам трансформаторной подстанции. При возможном случайном обрыве или перегорании провода из электрической схемы выпадает одна нитка нагревателя в то время, как остальные продолжают работать. Участок конструкции в зоне обрыва перестает получать тепло от оборванного провода, но теплота от соседних нагревателей предотвратит промерзание конструкции.

- выбор питающего напряжения зависит от длины проводника и типа станции прогрева. Чем больше длина, тем выше при данной мощности должно быть напряжение. Однако повышение температуры бетона и, соответственно, напряжения должно происходить постепенно (обычно ступенчато), например, последовательно используя ступени – 35, 45 и 60 В, что обеспечит плавный выход на расчетную мощность, которая будет обеспечиваться при 60 Вв течение необходимого времени.

- суммарная мощность прогрева бетона нагревателями ПНСВ в кВт определяет выбор оборудования (станции прогрева бетона, трансформаторы). Анализ рынка современных станций прогрева показал, что наиболее распространены в продаже и на строительных объектах Санкт-Петербурга станции прогрева бетона производства компании «ЭТА». В частности, это станции СПб-100, СПб-80, СПб-63, СПб-40, СПб-20. Данное оборудование позволяет прогревать бетон монолитных конструкций в зимнее время в промышленных масштабах.

В несколько меньшей степени, но также распространены подстанции КТПТО-80 и их различные модификации. Производство бетонных работ в зимнее время основано на применении вышеперечисленного оборудования. При незначительных объемах производства работ применяют также и другие трансформаторы напряжения, не являющиеся специализированным оборудованием.

### **Результаты и обсуждение**

В ходе проведенного исследования были выявлены достоинства и недостатки технологии зимнего бетонирования. Детальным образом рассмотрен метод электропрогрева с применением греющего провода ПНСВ в бетонировании тонкостенных конструкций. Проведен анализ существующих рекомендаций, методик

расчета и научных публикаций по выбранной тематике. Среди очевидных достоинств метода выделены: размещение нагревателей в теле бетона конструкций; ускорение набора прочности бетона под действием больших температур; относительная равномерность прогрева конструкций по сравнению с другими методами зимнего бетонирования; возможность осуществлять прогрев сразу после укладки смеси; доступность регулирования режима температурной обработки бетона. Недостатками метода являются: - отсутствие единой методики расчета параметров прогрева; приблизительность оценки распространения температуры в теле бетона и требуемой мощности прогрева путем математических расчетов; сложность монтажа электрических нагревателей, единообразие существующих подходов к реализации схемы подключения без оптимизации затрат.

### **Выводы**

1. Анализ теории и практики зимнего бетонирования монолитных конструкций с применением греющего провода показал необходимость оптимизации и совершенствования метода и внедрения новых технологий;

2. Изучены публикации и методики по выбранной тематике. Современные методические рекомендации не имеют единого расчета требуемой мощности прогрева. Ручной расчет на основе методик является приблизительным и может служить лишь примерным подбором оптимального шага укладки провода и подводимой теплоты. Оценка параметров электропрогрева не учитывает все влияющих факторов, таких как, интенсивность реакции гидратации в зависимости от времени и температуры, неравномерность теплопотерь в конструкции, изменение характеристик бетона в процессе прогрева.

3. На примере рассмотренной ситуации прогрева бетонизируемого перекрытия отмечено, что при производстве работ следует уделить внимание напряженно-деформированному состоянию бетона. Наличие температурных расширений и усадок влечет за собой риск трещинообразования. Особое внимание следует уделить бетонированию на объектах реконструкции, так как была доказана возможность риска трещинообразования бетонных элементов при интенсивном прогреве бетона и ограничении возможных деформаций.

4. Произведен анализ нормативной документации в области температурного контроля бетона при прогреве. Температурный мониторинг должен осуществляться современными средствами контроля, основанными на принципах автоматизации и автономности для обеспечения качества продукции.

5. Даны практические рекомендации для выбора организационно-технологической схемы зимнего бетонирования с применением нагревательных проводов. При выборе схемы подключения, длины и сечения нагревателя из провода ПНСВ, станции прогрева бетона необходим индивидуальный подход для каждой конструкции с учетом удобства монтажа и соблюдения режимов термообработки бетона согласно данным рекомендациям. Показано, как геометрические размеры конструкции могут повлиять на выбор схемы и проводов ПНСВ. Доказана возможность оптимизации метода на основе увеличения производительности труда с помощью подбора оптимальных длин нагревателей, схемы подключения и организации прогрева.

6. Продемонстрирована необходимость исключения риска обрыва провода при помощи тщательной проверки целостности и качества укладки провода в целях недопущения перепадов температур и промерзания конструкции в отдельных частях.

8. Особое внимание при производстве ответственных работ следует уделить организации контроля качества, основанной на мониторинге тепловлажностного режима, применении качественных материалов, соблюдении технологии производства работ и контроле прочности бетона.

### **Литература**

Головнев, С. Г. (1999). *Технология зимнего бетонирования. Оптимизация параметров и выбор методов*. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, с.156.

Доладов, Ю. И. (2014). Прогрев бетона греющим проводом в условиях реконструкции объекта. *В сборнике материалов 71-й Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР 2013 года «Традиции и инновации в строительстве и архитектуре»*. Самара, с. 922–923.

Крылов, Б. А. (1975). *Электропрогрев и электрообогрев бетона*. Москва: Стройиздат, с.264.

Красновский, Б. М. (2007). *Инженерно-физические основы методов зимнего бетонирования*. Москва: Изд-во ГАСИС, с. 512.

Пикус, Г. А., Мозгалёв, К. М. (2014). Оценка необходимого количества контрольных температурных точек при выдерживании монолитных плитных конструкций в зимнее время. *Академический вестник УралНИИпроект РААСН*, 3, с.70–71.

Молодин, В. В., Лунев, Ю. В. (2006). *Бетонирование монолитных строительных конструкций в зимних условиях*. Новосиб. Гос. Архитектур.-строит. Ун-т (Сибстрин), с.300.

Головнев, С. Г. (2004). *Технология бетонных работ в зимнее время*. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, с.70.

Хяутин, Ю. Г. (1966). *Монолитный бетон*. Москва: Стройиздат, с.175.

Мосаков, Б. С. (2006). *Технология зимнего бетонирования: учебное пособие*. Новосибирск: Изд-во СГУПС, с. 144.

Юдина, А. Ф., Верстов, В. В., Бадьин, Г. М. (2015). *Технологические процессы в строительстве*. Москва: Издательский центр «Академия», с.304.

ЦНИИОМТП, Госстроя СССР (1989). *Рекомендации по электропрогреву монолитного бетона и железобетона нагревательными проводами*. Москва: Изд-во ЦНИИОМТП, с.67.

Миронов, С. А. (1975). *Теория и методы зимнего бетонирования*. Москва: Стройиздат, с.700.