

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-12-32-46

**Маилян Л.Р., Стельмах С.А., \*Щербань Е.М., Доценко Н.А.**

Донской государственный технический университет

\*E-mail: au-geen@mail.ru

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЦЕНТРИФУГИРОВАННЫХ И ВИБРОЦЕНТРИФУГИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ КОНСТРУКТИВНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ БЕТОНА

**Аннотация.** В данной статье поднимается один из популярных вопросов: оценка расчетов дифференциальных конструктивных показателей центрифугированного и виброцентрифугированного бетонов. Установлено, что на разного рода слои бетона кольцевого сечения в процессе центрифугирования и виброцентрифугирования оказывают влияние силы, которые отличаются друг от друга по величине воздействия, что приводит к абсолютно разным показателям слоев бетона по плотности, прочности, деформативности и модулю упругости. Отметим, что главными факторами, на которые стоит обратить внимание и использовать в расчетных зависимостях в качестве аргументов, являются центробежные и центростремительные силы. Поэтому, в расчетах общего вида, где принимается во внимание изменение конструктивных показателей бетона, в качестве функций целесообразно использовать именно конструктивные показатели или же их прирост, а в качестве независимых переменных – силы инерции вращения, которые, в свою очередь, являются зависимостью расстояния от центра вращения и угловой скорости вращения. В итоге определены графически зависимости для расчета дифференцированного учета преобразований, требующихся для вычисления показателей бетона, что дает основания ввести в расчет конструкций отличающиеся по сечению прочностные и деформативные показатели бетона, и применять имеющиеся резервы несущей способности элементов.

**Ключевые слова:** центрифугированный бетон; виброцентрифугированный бетон; дифференциальные конструктивные характеристики; угловая скорость вращения.

**Введение.** Накопленный многочисленный опыт эксплуатации сборных железобетонных изделий и конструкций, изготовленных на предприятиях стройиндустрии, убеждает в преждевременном их разрушении в большинстве случаев несмотря на то, что сырье для получения бетона и его показатели полностью соответствовали предъявляемым требованиям к конструкциям и условиям эксплуатации.

Проанализировав источники, [1–16] авторы выявили закономерности и причины раннего разрушения таких конструкций, как стойки опор линий электропередачи, железобетонные шпалы и лотки оросительных каналов.

В результате проведенного анализа можно сделать акцент на причинах раннего разрушения конструкций, связанных с воздействием напряженно-деформированного состояния бетона, режима эксплуатации, цикличности замораживания и оттаивания в зимний период и водонасыщения и высушивания бетона в теплое время года.

В эксплуатационных условиях помимо напряжений от внешней нагрузки развиваются напряжения, обусловленные воздействием среды. Величина этих напряжений, обычно не учитываемая в расчетах, зависит от свойств бетона и интенсивности этих воздействий и может достигать значительных величин. Внутренние

напряжения суммируются с однозначными напряжениями от эксплуатационной нагрузки при определенных условиях достигают предела прочности бетона на растяжение, что вызывает преждевременное появление дефектов.

Ряд опубликованных к настоящему времени работ по результатам исследований прочности железобетонных элементов в рассматриваемых условиях свидетельствует об отсутствии у исследователей единодушного мнения о степени влияния тех или иных вызывающих разрушение факторов, а предложенные мероприятия по повышению долговечности не имеют достаточной экспериментальной проверки сравнительной их эффективности [1–16].

Данные натурных и экспериментальных исследований позволяют считать, что локальный характер разрушения железобетонных элементов как в натурных, так и в лабораторных условиях, вызван совместным воздействием многократного замораживания и оттаивания и местных растягивающих напряжений, обусловленных характером взаимодействия арматуры с бетоном [8].

Для конкретных прогнозов долговечности и проектирования конструкций, подвергаемых в процессе эксплуатации переменным воздействиям окружающей среды, кроме изучения механизма разрушения элементов при таких воз-

действиях, необходимо установить количественные зависимости между конструктивными особенностями железобетонного изделия со свойствами бетона, из которого оно изготовлено.

В связи с этим необходимо первоочередное решение следующих вопросов:

1) выбор оптимальных видов арматуры с учетом профиля и диаметра;

2) выбор оптимальной степени предварительного напряжения в зависимости от вида арматуры;

3) разработка методики оценки профиля арматуры с точки зрения изготовления конструкции наибольшей прочности;

4) разработка эффективных мер по обеспечению необходимой прочности бетона в зонах анкеровки арматуры;

5) исследования влияния состава бетона на прочность железобетона с целью выбора оптимальных решений [3, 4, 9–16].

Центрифугирование, как способ уплотнения бетонной смеси, начало применяться с начала двадцатого века при производстве металлов и железобетонных изделий в форме элементов кольцевого сечения.

Слабое владение теорией метода производства изделий из бетона – центрифугирования – негативно отразилось на технологии изготовления широкого спектра изделий и конструкций, в частности колонн, труб, стоек опор линий электропередачи. Поэтому появилась потребность в изучении множества вопросов, связанных с технологией и рецептурой получаемых центрифугированием бетонных смесей, в частности структуры цементного теста и его реологических характеристик.

Подача бетонной смеси во вращающуюся форму может осуществляться порционно или же однократно.

Влияние прессующего давления определенного значения способствует сохранению пластических свойств смеси и ее способности к однородному распределению по всей длине формы без разрушения бетона во время ее вращения.

Учитывая реологические свойства, сопротивление сжатию цементного камня зависит от количества свободной воды в нем: чем ее меньше, тем выше сопротивление.

Центробежная сила создает прессующее давление, значение которого различно по толщине стенки изделия (минимально у внутреннего слоя и максимально у внешнего слоя). Поэтому для уплотнения близлежащих к оси формы слоев величина прессующего давления должна увеличиваться даже после максимального уплотнения наружного слоя.

Процесс уплотнения при помощи центрифугирования способствует различиям в водоцементном отношении и пористости бетона по толщине стенки изделия.

Для выяснения характера и причин разрушения бетона, подвернутого действию внешних сил, большой интерес представляет исследование поведения материала от начала воздействия до разрушения. Такое описание поведения материала дают реологические методы и модели.

В процессе уплотнения бетонной смеси прессующее давление от центробежных сил неравномерно распределено по толщине стенки формируемого изделия. Соответственно этому происходит отжатие воды из отдельных зон бетона. В результате образуется материал-конгломерат с различной концентрацией зерен отдельных фракций в сечении и направленной пористостью (миграционные и фильтрационные потоки).

Нами по признаку однородности кольцевого сечения центрифугированного изделия условно разделено на три слоя, для которых установлены основные характеристики. Относительный объем каждого из рассматриваемых слоев и расчетные коэффициенты принимались с учетом опытных и литературных данных [17–21].

Известно, что большее количество структурных и капиллярных пор, являющихся основным источником пониженной прочности бетона, содержится в мелкозернистом конгломерате. Структурные поры в основном представлены фильтрационными потоками, количество и размер которых возрастает по мере приближения к внутренней полости изделия. Цементный камень характеризуется значительным объемом капиллярных пор, что не позволяет считать его прочным защитным слоем. Шлам, если его удаляют не полностью из полости, также не выполняет защитных функций, так как капиллярная пористость его в затвердевшем состоянии достигает 84 %.

Анализ технологий производства центрифугированных колонн показал, анизотропию структуры по толщине стенки сечения центрифугированных колонн. Вследствие этого при производстве центрифугированных изделий происходит возникновение во всех слоях бетона продольных трещин [1–8].

Причем, даже учитывая все качественные требования к сырьевым компонентам, изготовления бетонной смеси и применения рациональных производственных режимов центрифугирования, анизотропия и сопутствующие ей дефекты все равно имеют место быть.

Прочностные характеристики бетонов, полученных с помощью центрифугирования экспериментальных образцов желательнее исследовать в условиях, практически идентичных условиям изготовления реальных изделий и конструкций.

Прочностные и деформативные характеристики бетона значительно разнятся между слоями кольцевого сечения, например, большая сжимаемость и усадка характерны для внутреннего слоя. Большое влияние также оказывает и продолжительность твердения бетона: чем «старше» бетон, тем меньше различия в деформациях между слоями сечения.

Улучшить процесс структурообразования бетона, полученного центрифугированием, представляется возможным с помощью формования по слоям или же путем применения дополнительной вибрации во время центрифугирования бетона.

На сегодняшний момент изучение вариативных бетонных и железобетонных изделий и конструкций кольцевого сечения имеет уже довольно широкую область. Разнообразие силовых воздействий предопределяет поиск нетрадиционных видов расчета таких изделий и конструкций.

Известно, что получить бетоны с улучшенной структурой и характеристиками в сравнении с центрифугированием и вибрированием можно способом виброцентрифугирования.

Однако в немногочисленных работах по бетонным и железобетонным конструкциям кольцевого сечения исследовалось влияние вида технологии на дифференциальные (различающиеся по сечению) характеристики бетона. В то же время очевидно, что вследствие влияния центробежных и центростремительных сил инерции при центрифугировании и, тем более, при виброцентрифугировании характеристики бетона по сечению становятся различными и эти различия могут быть значительными.

В настоящей работе экспериментально и аналитически исследуются качественная и количественная картины таких различий в характеристиках бетонов, полученных по разным технологиям. Очевидно, что для расчетного учета этих различий понадобится ввести некие различные характеристики по сечению элементов. Введем с этой целью термин «дифференциальные характеристики бетона».

Известно, что на разного рода слои бетона кольцевого сечения в процессе центрифугирования и виброцентрифугирования оказывают влияние силы, которые отличаются друг от друга по величине воздействия, что приводит, в результате, к абсолютно разным показателям бетона слоев, прежде всего это относится к плотности, прочности, а также к модулю упругости [1–8].

Следует отметить, что главными факторами, на которые стоит обращать внимание и в дальнейшем использовать в расчетных зависимостях в качестве аргументов, являются центробежные и центростремительные силы.

Таким образом, в расчетных зависимостях общего вида, где принимается во внимание изменение конструктивных показателей бетона, в качестве функций целесообразно использовать именно конструктивные показатели или же их прирост (в абсолютных или относительных показателях), а в качестве независимых переменных – непосредственно силы инерции вращения, которые, в свою очередь, являются зависимостью расстояния от центра вращения и угловой скорости вращения.

Результатом решения данной задачи являются расчетные зависимости для дифференцированного учета преобразования всех требующихся для проведения вычислений показателей бетона, что предоставляет возможность ввести в расчет конструкций отличающиеся по сечению прочностные и деформативные показатели бетона, применив при этом уже существующие резервы несущей способности элементов.

**Материалы и методы.** Проанализировав источники [1–16] выявлено, что главной особенностью процесса центрифугированного уплотнения бетонной смеси является действие центробежных сил, которые пропорциональны расстоянию от оси вращения, квадрату угловой скорости и массе частиц:

$$F_{ц.с.} = \frac{4}{3g} \pi \cdot r_{к.з.}^3 \cdot \rho_{к.з.} \cdot l \cdot \omega^2 \quad (1)$$

где  $l$  – расстояние от оси вращения до центра частицы заполнителя, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $r_{к.з.}^3$  – радиус частицы крупного заполнителя, м;  $\rho_{к.з.}$  – плотность частиц крупного заполнителя, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega$  – угловая скорость вращения, рад/с:

$$\omega = \frac{\pi n}{30} \quad (2)$$

где  $n$  – количество оборотов, рад/с.

Заметим, что чем больше радиус  $r_{к.з.}$  и плотность  $\rho_{к.з.}$  частицы, тем сильнее на неё воздействует центробежная сила (рис. 1). Именно поэтому, частицы распределяются по слоям изделия следующим образом: более крупные зерна передвигаются ближе к внешнему слою изделия, а более мелкие частицы распределяются, в основном, по внутреннему слою.

Необходимо также обратить внимание на более обобщенную формулу, по которой производится расчет центробежной силы, в ней  $F_{ц.с.} = f(\omega, l)$ :

$$F_{ц.с.} = m \cdot \omega^2 \cdot l \quad (3)$$

где  $m$  – масса вращающегося тела, кг;  $\omega$  – угловая скорость вращения, рад/с;  $l$  – расстояние от центра оси вращения до центра частицы заполнителя, м.

Таким образом, важнейшее отличие центрифугированного бетона от вибрированного заключается в неоднородности распределения зерен крупного заполнителя по толщине сечения изделия, что оказывает влияние на расхождение характеристик различных слоев бетона – вариатрпию сечения.

Особенно это относится к виброцентрифугированным бетонам, для которых вариатропия характерна в еще большей степени. В изделиях из виброцентрифугированного бетона концентрация частиц крупного заполнителя, а, следовательно, и прочности у внешних слоев еще больше.

Представленные факты являются доказательством того, что при расчетах необходимо учитывать различия как в прочности, так и в деформативности слоев бетона вариатропных сечений.

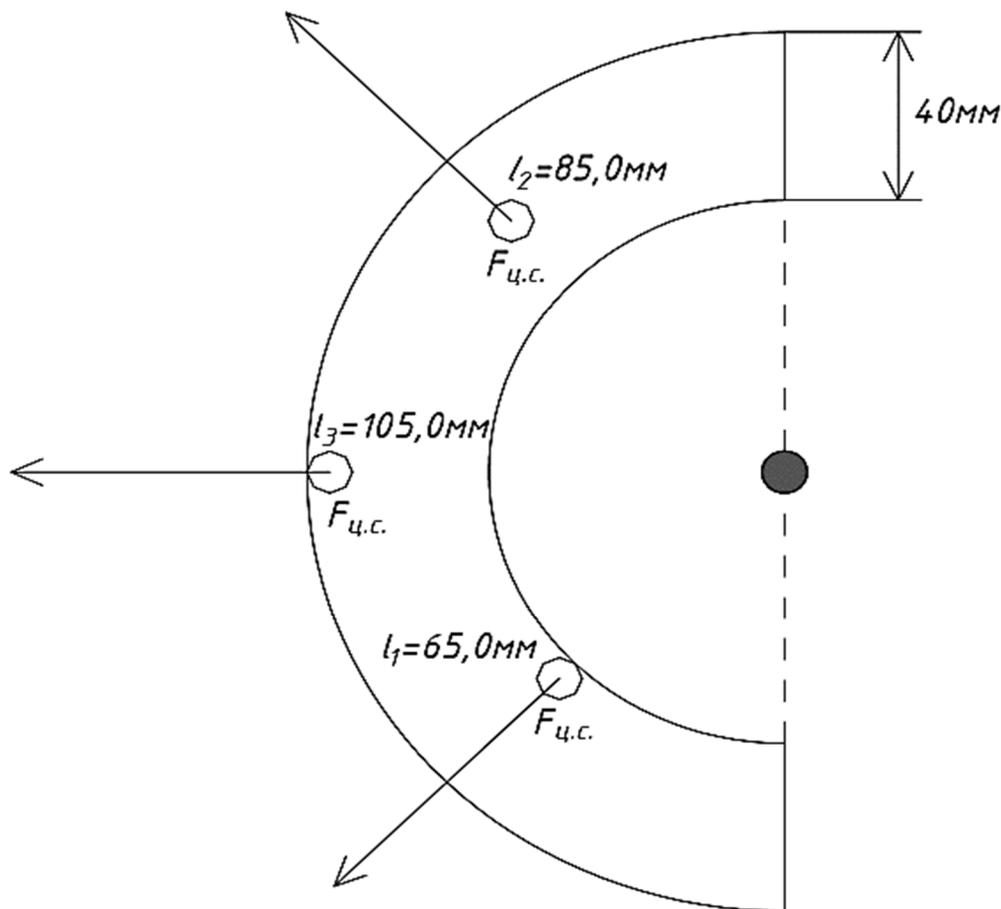


Рис. 1. Чертеж оказываемого воздействия центробежных сил на частицы крупного заполнителя по слоям изделия, произведенного методом центрифугирования

**Основная часть.** Для доказательства необходимо выполнить расчет воздействия центробежной силы на частицу. Для примера возьмем плотный (гранитный) заполнитель. Для того, чтобы получить величину центробежной

силы, которая действует на частицу гранита, необходимо принять во внимание в расчетах все имеющиеся первичные данные в формуле (1). В табл. 1 представлены результаты произведенного расчета:

Таблица 1

**Основные параметры действующей центробежной силы**

Радиус частиц крупного заполнителя, мм	Расстояние от центра вращения до центра частицы, м	Угловая скорость вращения, рад/с	Скорость вращения формы при центрифугировании об/мин	Давление на бетонную смесь, $p$ кгс/см <sup>2</sup>	Центробежная сила, действующая на частицу крупного заполнителя, Н
9,0	0,106	76	800	0,5	$294,4 \cdot 10^{-6}$
		149	1500	1,98	$1083,5 \cdot 10^{-6}$

Воспользуемся методом математического планирования эксперимента, для этого требуется принять полный факторный эксперимент ПФЭ  $2^k$ . Опираясь на наши выводы [17–21], возьмем временной показатель центрифугирования 4,2 минуты. В табл. 2 приводятся данные факторов варьирования и их физический смысл.

За функцию отклика целесообразно принять следующие параметры:

- $Y_1 (X_1, X_2)$  – прочность на осевое сжатие, МПа;
- $Y_2 (X_1, X_2)$  – прочность на осевое растяжение, МПа;
- $Y_3 (X_1, X_2)$  – предельные деформации при осевом сжатии, мм/м;
- $Y_4 (X_1, X_2)$  – предельные деформации при осевом растяжении, мм/м;
- $Y_5 (X_1, X_2)$  – модуль упругости, МПа.

Таблица 2

Значение факторов варьирования ПФЭ  $2^k$ 

Код фактора	Физический смысл фактора	Ед. изм.	Интервал варьирования	Уровни факторов		
				-1	0	+1
$X_1$	Расстояние от центра вращения до центра зерна	мм	$\pm 40$	80	130	180
$X_2$	Угловая скорость	рад/с	$\pm 28$	76	112	148

В итоге, опираясь на данные, полученные в результате проведенных экспериментов, методом наименьших квадратов, были составлены

базовые уравнения регрессии, представленные в виде полиномов 2-ой степени:

$$Y (X_1, X_2) = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_1 \cdot X_2 + B_4 \cdot X_1^2 + B_5 \cdot X_2^2 \quad (4)$$

Статистический анализ позволил определить следующие показатели: значимость коэффициентов, однородность дисперсий и адекватность, которая, в свою очередь, была подвергнута проверке по критерию Фишера.

Последовательность проведенных исследований и результаты параметров оптимизации были выбраны в соответствии с уже проведенными нами испытаниями, которые представлены в [17–21].

По расчетному значению критерия Стьюдента  $t$  установлена значимость коэффициентов уравнений. Статистическая обработка данных выполнялась с помощью программы «Mathcad».

Теперь необходимо подставить в формулы для вычисления дифференциальных показателей вариатропных сечений центрифугированного и виброцентрифугированного бетонов полученные нами уравнения регрессии.

На рис. 2–7 мы продемонстрировали наглядное представление математических корреляций. Для примера был выбран средний слой центрифугированного и виброцентрифугированного бетонов.

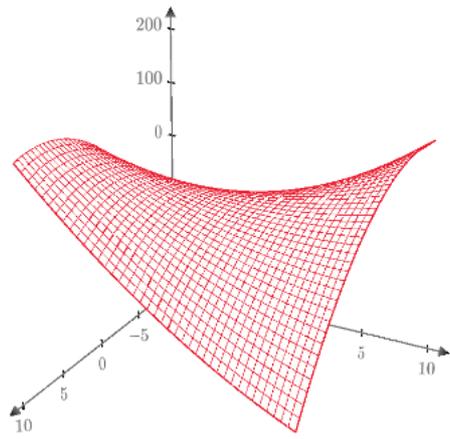
### Выводы

1. На основе экспериментов доказано и теоретически обосновано, что в процессе центрифугирования и виброцентрифугирования на разного рода слои бетона кольцевого сечения оказывают воздействие силы, которые отличаются друг от друга по величине воздействия, что приводит к вариатропии и деформативности слоев бетона.

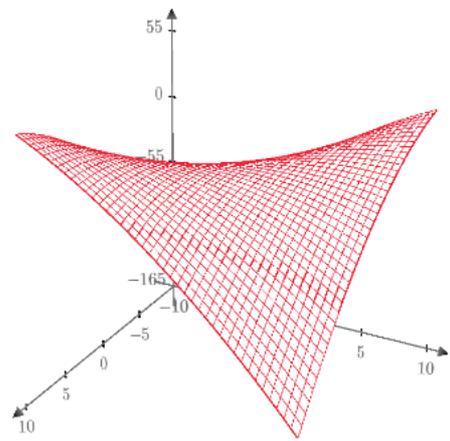
2. Установлено, что наибольшее влияние оказывают центростремительные и центробежные силы, значения которых зависят от таких параметров, как «расстояние от центра вращения» и «угловая скорость вращения».

3. Чтобы оценить дифференциальные показатели бетона в процессе центрифугирования и виброцентрифугирования нами были использованы расчетные зависимости общего вида, в которых в качестве функций приняты конструктивные показатели бетона, а в качестве независимых переменных – силы инерции вращения.

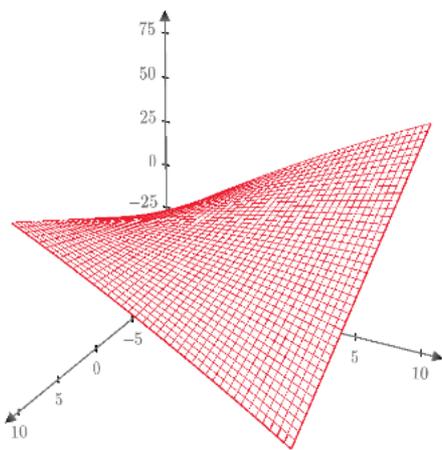
4. Определены представленные графически зависимости, необходимые для расчета дифференцированных прочностных и деформативных показателей центрифугированного и виброцентрифугированного бетонов, которые предоставляют возможность использовать в расчетах конструкций отличающиеся по сечению показатели бетона.



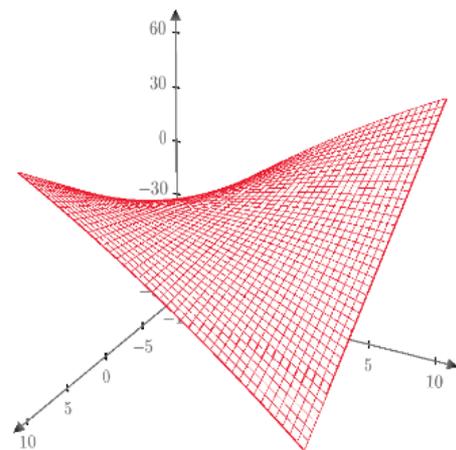
а



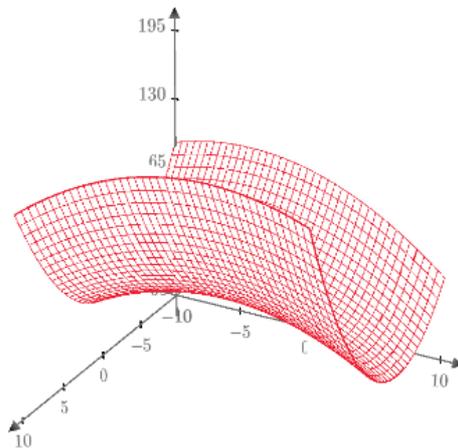
б



в

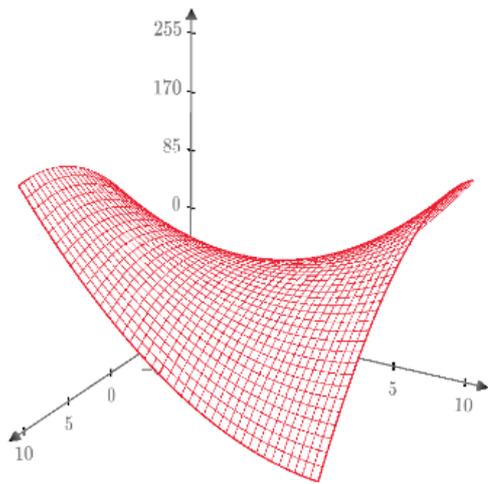


г

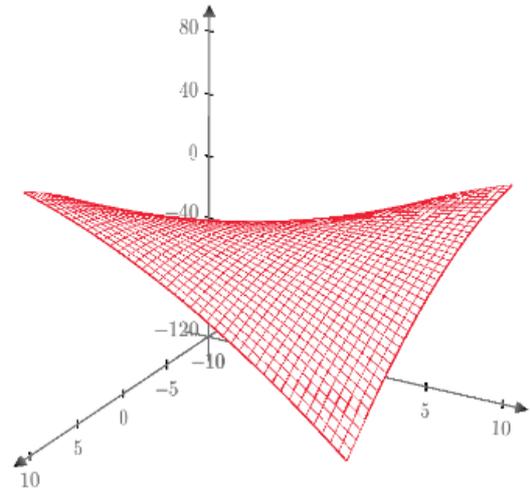


д

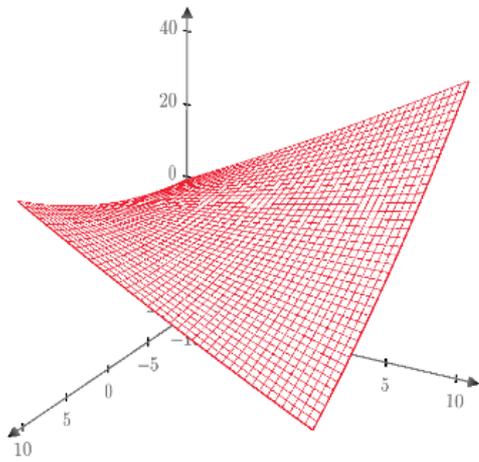
Рис. 2. Наглядное представление зависимости прочности на сжатие а) и растяжение б), предельных деформаций при сжатии в) и растяжении г), модуля упругости (д) внутреннего слоя вариатропного сечения центрифугированного бетона от расстояния от центра вращения до центра частицы и угловой скорости



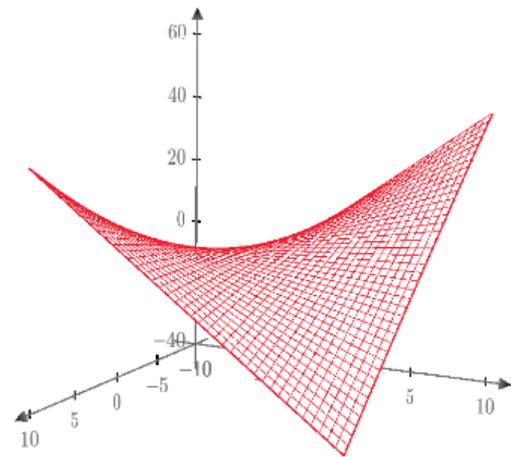
а



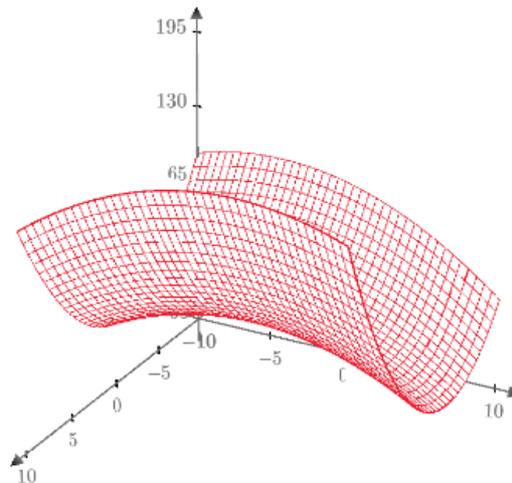
б



в



г



д

Рис. 3. Наглядное представление зависимости прочности на сжатие а) и растяжение б), предельных деформаций при сжатии в) и растяжении г), модуля упругости (д) среднего слоя вариатропного сечения центрифугированного бетона от расстояния от центра вращения до центра частицы и угловой скорости

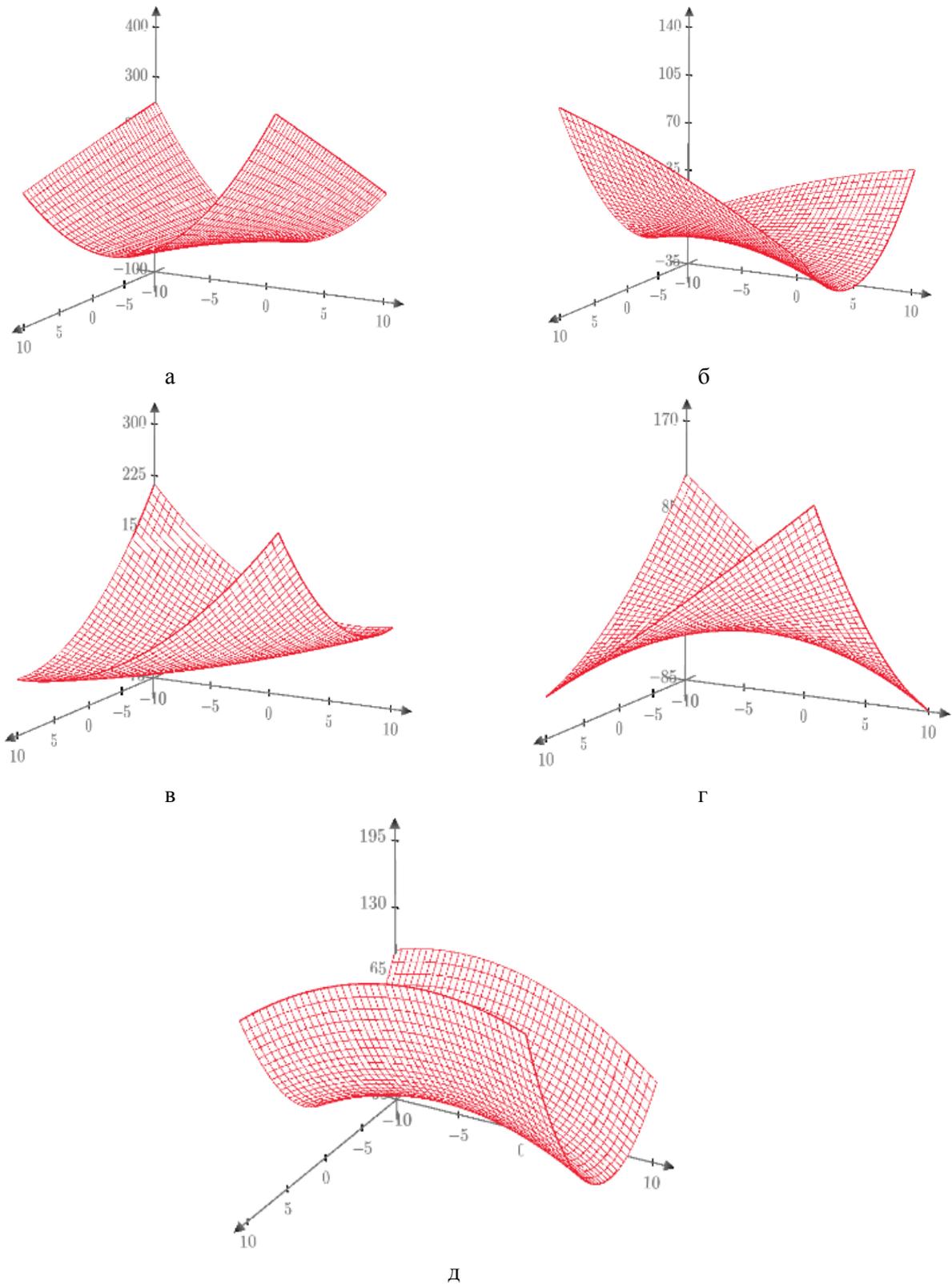


Рис. 4. Наглядное представление зависимости прочности на сжатие а) и растяжение б), предельных деформаций при сжатии а) и растяжении б), модуля упругости (д) внешнего слоя вариатропного сечения центрифугированного бетона от расстояния от центра вращения до центра частицы и угловой скорости

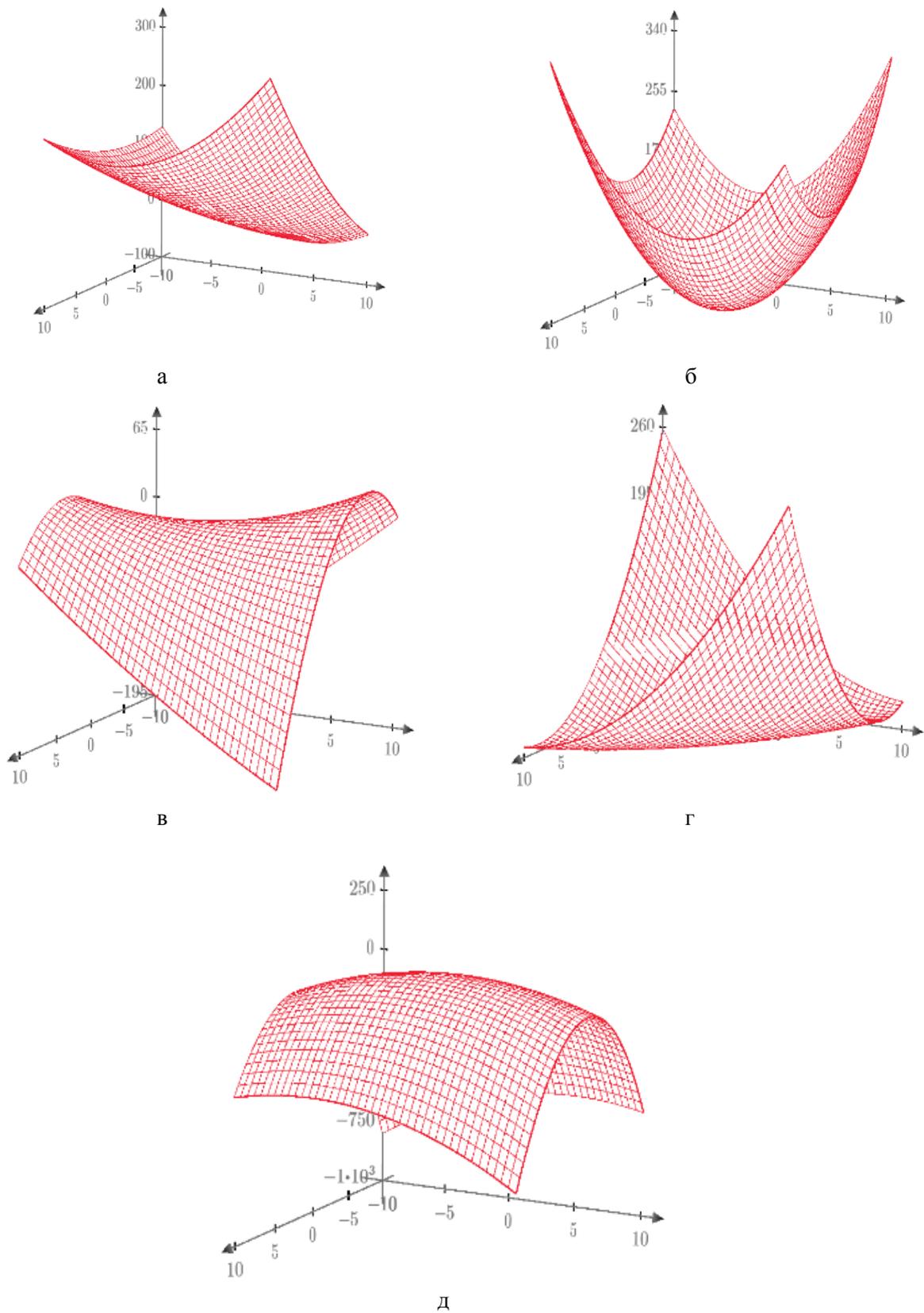
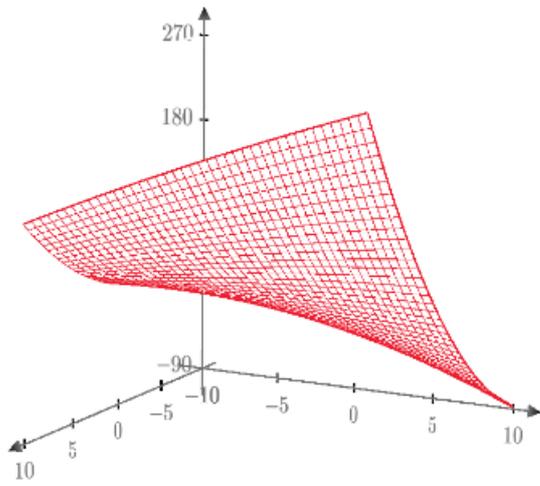
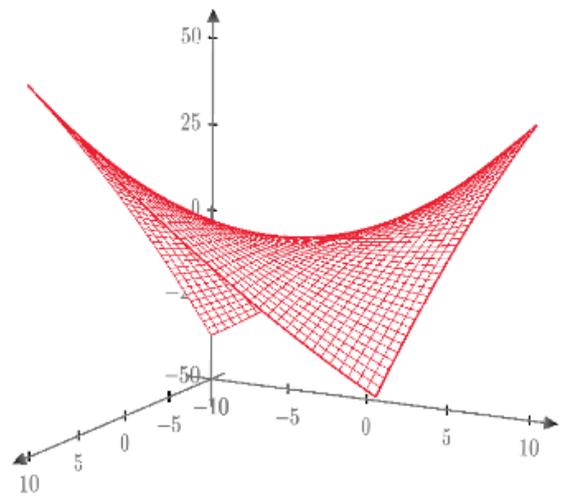


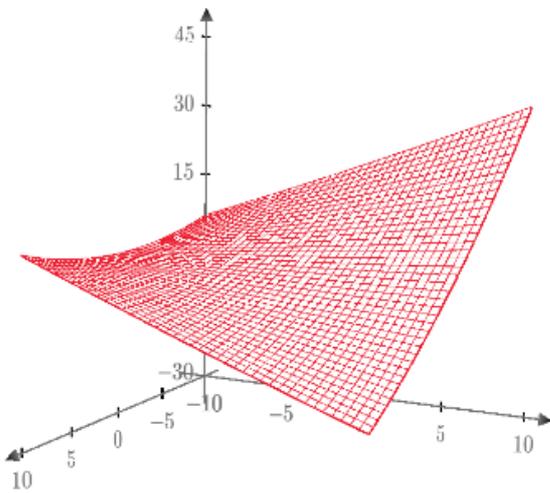
Рис. 5. Наглядное представление зависимости прочности на сжатие а) и растяжение б), предельных деформаций при сжатии а) и растяжении б), модуля упругости (д) внутреннего слоя вариатропного сечения виброцентрифугированного бетона от расстояния от центра вращения до центра частицы и угловой скорости



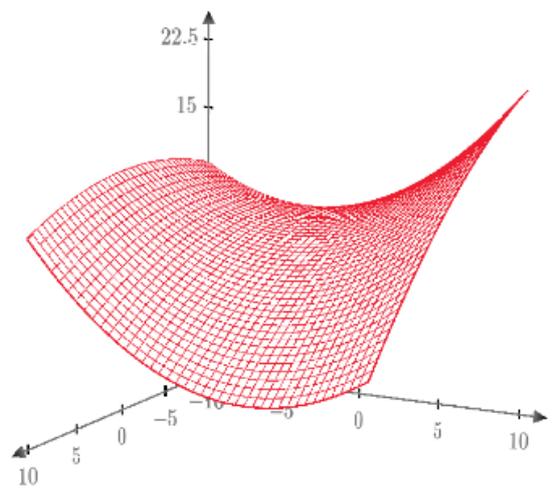
а



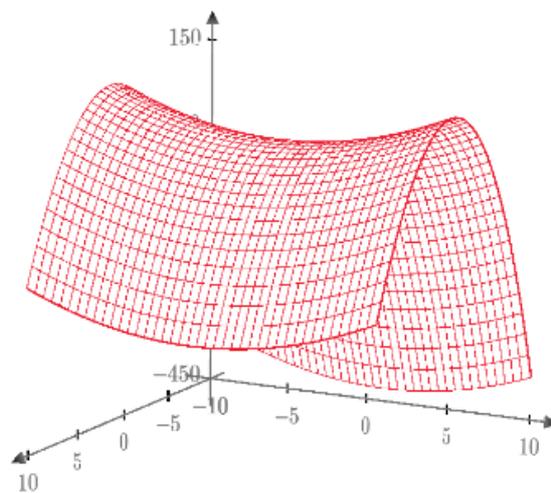
б



в

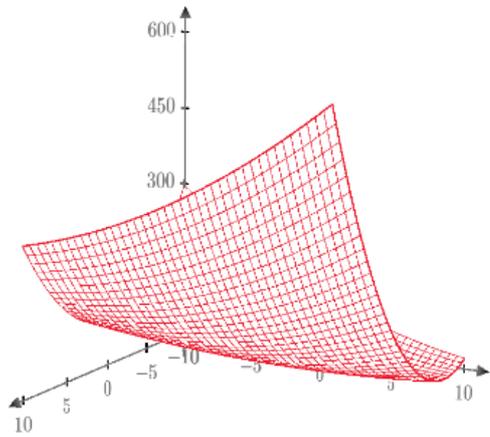


г

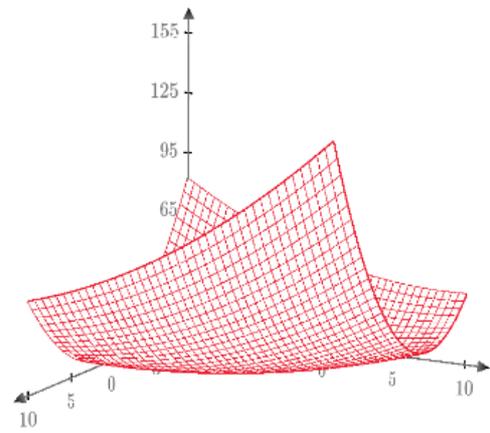


д

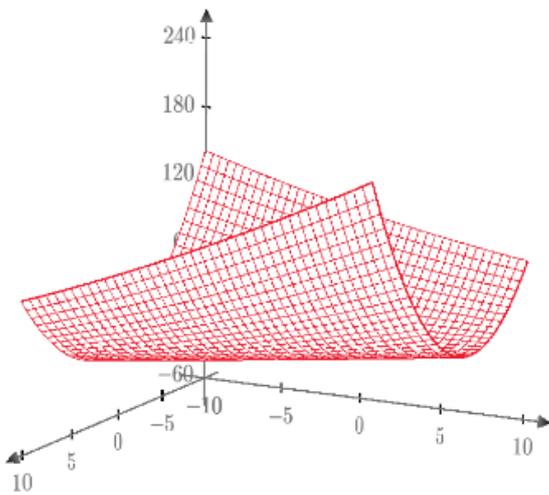
Рис. 6. Наглядное представление зависимости прочности на сжатие а) и растяжение б), предельных деформаций при сжатии а) и растяжении б), модуля упругости (д) среднего слоя вариатропного сечения виброцентрифугированного бетона от расстояния от центра вращения до центра частицы и угловой скорости



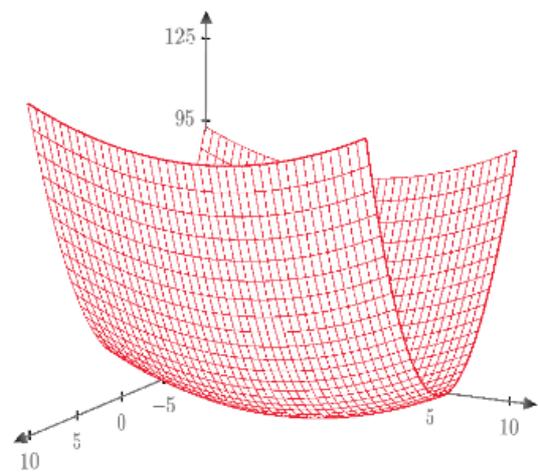
а



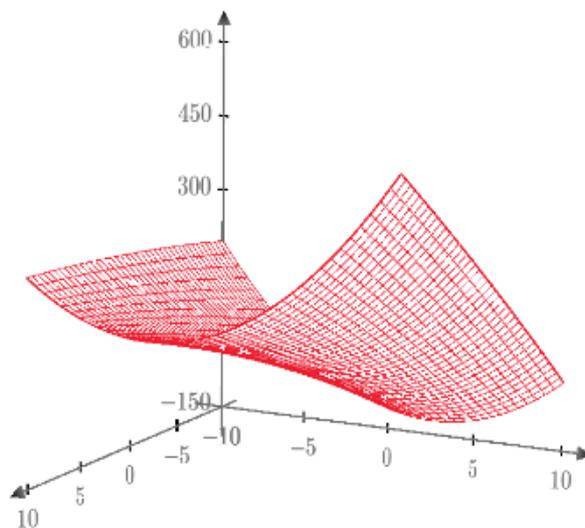
б



в



г



д

Рис. 7. Наглядное представление зависимости прочности на сжатие а) и растяжение б), предельных деформаций при сжатии а) и растяжении б), модуля упругости (д) внешнего слоя вращающегося сечения виброцентрифугированного бетона от расстояния от центра вращения до центра частицы и угловой скорости

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженов Ю.М. Современная технология бетона // Технологии бетонов. 2005. № 1. С. 6–8.
2. Щуцкий В.Л., Гриценко М.Ю., Дедух Д.А. Исследование физико-механических свойств центрифугированного бетона // Инженерный вестник Дона. 2015. № 2. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_81\\_Shucki.pdf\\_4abcf9232c.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_81_Shucki.pdf_4abcf9232c.pdf). (дата обращения: 05.10.2020).
3. Иващенко Е.И. Разработка методов расчета железобетонных элементов на основе действительных диаграмм деформирования материалов с учетом фактического изменения площади их поперечных сечений: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж: Изд-во ГАСУ, 2006. 230 с.
4. Крючков А.А., Жданов А.Е. Подходы к оценке деформативности изгибаемых железобетонных элементов на основе итерационных методов расчета // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2017. №1. С. 73–76.
5. Маилян Л.Р., Маилян А.Л., Айвазян Э.С. Расчетная оценка прочностных и деформативных характеристик и диаграмм деформирования фибробетонов с агрегированным распределением волокон // Инженерный вестник Дона. 2013. № 3. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_28\\_Mailian.pdf\\_1760.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_28_Mailian.pdf_1760.pdf) (дата обращения: 07.10.2020).
6. Обернихин Д.В., Никулин А.И. Экспериментальные исследования деформативности изгибаемых железобетонных элементов различных поперечных сечений // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2017. № 4. С. 56–59.
7. Польской П.П., Маилян Д.Р., Георгиев С.В. Прочность и деформативность коротких усиленных стоек при малых эксцентриситетах // Инженерный вестник Дона. 2014. № 4. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_149\\_Mailyan.pdf\\_18e03c87ba.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_149_Mailyan.pdf_18e03c87ba.pdf) (дата обращения: 05.10.2020).
8. Радайкин О.В. Сравнительный анализ различных диаграмм деформирования бетона по критерию энергозатрат на деформирование и разрушение // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 10. С. 29-39.
9. Maruyama I., Lura P. Properties of early-age concrete relevant to cracking in massive concrete // Cement and Concrete Research. 2019. №. 123. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.05.015.
10. Kim J-J., Yoo D-Y. Effects of fiber shape and distance on the pullout behavior of steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete // Cement and Concrete Composites. 2019. № 103. Pp. 213–223. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.05.006.
11. Li K., Li L. Crack-altered durability properties and performance of structural concretes // Cement and Concrete Research. 2019. № 124. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105811.
12. Kirthika S.K., Singh S.K. Durability studies on recycled fine aggregate concrete // Construction and Building Materials. 2020. № 250. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118850.
13. Hameed M.A.S., Maula B.H., Bahnam Q.M. An empirical relationship between compressive strength and ultrasonic pulse velocity for concrete // International Review of Civil Engineering. 2019. № 10(6). DOI: 10.15866/irece.v10i6.17061.
14. Alexander M., Beushausen H. Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures – review and critique // Cement and Concrete Research. 2019. № 122. Pp. 17–29. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.04.018.
15. Geiker M.R., Michel A., Stang H., Lepech M.D. Limit states for sustainable reinforced concrete structures // Cement and Concrete Research. 2019. № 122. Pp. 189-195. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.04.013.
16. Khalaf M.A., Ban C.C., Ramli M. The constituents, properties and application of heavyweight concrete: A review // Construction and Building Materials. 2019. № 215. Pp. 73–89. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.146.
17. Холодняк М.Г., Стельмах С.А., Щербань Е.М., Третьяков Д.А., Дао В.Н., Заикин В.И. Предложения по расчетному определению прочностных характеристик вибрированных, центрифугированных и виброцентрифугированных бетонов // Вестник Евразийской науки. 2018. № 6. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <https://esj.today/PDF/66SAVN618.pdf> (дата обращения: 07.10.2020).
18. Mailyan L.R., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Kholodnyak M.G. Determination and use of hidden strength reserves of centrifuged reinforced constructions by means of calculation and experimental methods // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2020. № 1(45). Pp. 6–14. DOI: 10.25987/VSTU.2020.45.1.001.
19. Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Shuyskiy A.I., Nazhnev M.P. Theoretical and Practical Aspects of the Formation of the Variational Structure of Centrifuged Products from Heavy Concrete // Materials Science Forum. 2018. № 931. Pp. 502–507. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.502.

20. Shuyskiy A.I., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Kholodnyak M.G. Investigation of the influence of the initial composition of heavy concrete designed for the manufacture of ring-section products on its properties // Materials Science Forum. 2018. № 931. Pp. 508–514. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.508.

21. Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Zholobova O.A. Prescription and Technological Aspects of Manufacturing High-Quality Centrifuged Products and Structures from Heavy Concrete // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018. Vol. 463. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.508.

#### Информация об авторах

**Маилян Левон Рафаэлович**, доктор технических наук, профессор кафедры автомобильных дорог. E-mail: lrm@aaanet.ru. Донской государственный технический университет. Россия, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1.

**Стельмах Сергей Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов. E-mail: sergej.stelmax@mail.ru. Донской государственный технический университет. Россия, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1.

**Щербань Евгений Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов. E-mail: au-geen@mail.ru. Донской государственный технический университет. Россия, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1.

**Доценко Наталья Александровна**, магистрант кафедры технологического инжиниринга и экспертизы в строительной индустрии. E-mail: natalya\_1998\_dotsenko@mail.ru. Донской государственный технический университет. Россия, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1.

Поступила 25.10.2020 г.

© Маилян Л.Р., Стельмах С.А., Щербань Е.М., Доценко Н.А., 2020

**Mailyan L.R., Stel'makh S.A., \*Shcherban' E.M., Dotsenko N.A.**

Don State Technical University

\*E-mail: au-geen@mail.ru

## FEATURES OF CALCULATION OF CENTRIFUGED AND VIBRO-CENTRIFUGED REINFORCED CONCRETE STRUCTURES BY DIFFERENTIAL CONSTRUCTION CHARACTERISTICS OF CONCRETE

**Abstract.** This article raises one of the most popular questions: evaluation of calculations of differential design parameters of centrifuged and vibro-centrifuged concrete. It is established that various layers of concrete of annular cross-section in the process of centrifugation and vibro-centrifugation are influenced by forces that differ from each other in the magnitude of the impact. This leads to completely different indicators of concrete layers in density, strength, deformability and modulus of elasticity. Centrifugal and centripetal forces are the main factors that are worth to pay attention to and to use in the calculated dependencies as arguments. Therefore, in general calculations, which take into account the change in the structural parameters of concrete, it is advisable to use the structural indicators or their increase as functions, and as independent variables – the forces of inertia of rotation, which, in turn, are the dependence of the distance from the center of rotation and the angular velocity of rotation. As a result, the calculated dependencies are derived for the differentiated accounting of changes in all the characteristics of concrete necessary for calculating, which gives grounds to enter into the calculation of structures the strength and deformation indicators of concrete that differ in cross section, and to use the existing reserves of the bearing capacity of elements.

**Keywords:** centrifuged concrete, vibro-centrifuged concrete, differential design characteristics, distance from the center of rotation; angular velocity of rotation.

### REFERENCES

1. Bazhenov Yu.M. Modern concrete technology. [Sovremennaya tekhnologiya betona]. Concrete technology. 2005. No. 1. Pp. 6–8.
2. Shchutskii V.L., Gritsenko M.Yu., Dedukh D.A. Study of the physico-mechanical properties of

centrifuged concrete [Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv centrifugirovannogo betona]. Engineering journal of Don. 2015. No. 2. AdobeAcrobatReader. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2p2y2015/3000> (date of treatment: 05.10.2020).

3. Ivashchenko E.I. Development of methods for calculating reinforced concrete elements based on actual diagrams of deformation of materials, taking into account the actual change in the area of their cross sections [Razrabotka metodov rascheta zhelezobetonnykh elementov na osnove dejstvitel'nykh diagram deformirovaniya materialov s uchetom fakticheskogo izmeneniya ploshchadi ih poperechnykh sechenij]. Voronezh. State University of Architecture and Civil Engineering, 2006. 230 p. (rus)
4. Kryuchkov A.A., Zhdanov A.E. Approaches to assessing the deformability of flexible concrete elements based on iterative calculation methods [Podhody k ocenke deformativnosti izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov na osnove iteratsionnykh metodov rascheta]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 1. Pp. 73–76. (rus)
5. Mailyan L.R., Mailyan A.L., Aivazyan E.S. Estimated Strength and Deformation Characteristics and Fiber Concrete Deformation Diagrams with Aggregated Fiber Distribution [Raschetnaya oценка prochnostnykh i deformativnykh karakteristik i diagram deformirovaniya fibrobetonov s agregirovannym raspredeleniem volokon]. Engineering journal of Don. 2013. No. 3. AdobeAcrobatReader. URL: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_28\\_Mailian.pdf\\_1760.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_28_Mailian.pdf_1760.pdf) (date of treatment: 07.10.2020).
6. Obernikhin D.V., Nikulin A.I. Experimental studies of the deformability of bendable reinforced concrete elements of various cross sections [Eksperimental'nye issledovaniya deformativnosti izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov razlichnykh poperechnykh sechenij]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 4. Pp. 56–59. (rus)
7. Pol'skoi P.P., Mailyan D.R., Georgiev S.V. Strength and deformability of short reinforced racks with small eccentricities [Prochnost' i deformativnost' korotkiy usilennykh stoek pri malykh ekscentrisitetah]. Engineering journal of Don. 2014. No. 4. AdobeAcrobatReader. URL: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_149\\_Mailyan.pdf\\_18e03c87ba.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_149_Mailyan.pdf_18e03c87ba.pdf) (date of treatment: 05.10.2020). (rus)
8. Radaikin O.V. Comparative analysis of various diagrams of concrete deformation according to the criterion of energy consumption for deformation and destruction [Sravnitel'nyy analiz razlichnykh diagram deformirovaniya betona po kriteriyu energozatrat na deformirovanie i razrushenie]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. Vol. 4. No. 10. Pp. 29–39. (rus)
9. Maruyama I., Lura P. Properties of early-age concrete relevant to cracking in massive concrete. Cement and Concrete Research. 2019. Vol. 123. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.05.015.
10. Kim J.-J., Yoo D.-Y. Effects of fiber shape and distance on the pullout behavior of steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete. Cement and Concrete Composites. 2019. Vol. 103. Pp. 213–223. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.05.006.
11. Li K., Li L. Crack-altered durability properties and performance of structural concretes. Cement and Concrete Research. 2019. Vol. 124. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105811.
12. Kirthika S.K., Singh S.K. Durability studies on recycled fine aggregate concrete. Construction and Building Materials. 2020. Vol. 250. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118850.
13. Hameed M., Maula B., Bahnam Q. An empirical relationship between compressive strength and ultrasonic pulse velocity for concrete. International Review of Civil Engineering. 2019. Vol. 10. No. 6. DOI: 10.15866/irece.v10i6.17061.
14. Alexander M., Beushausen H. Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures – review and critique. Cement and Concrete Research. 2019. Vol. 122. Pp. 17–29. DOI: DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.04.018.
15. Geiker M.R., Michel A., Stang H., Lepech M.D. Limit states for sustainable reinforced concrete structures. Cement and Concrete Research. 2019. Vol. 122. Pp. 189–195. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.04.013.
16. Khalaf M.A., Cheah C., Ramli M. The constituents, properties and application of heavyweight concrete: A review. Construction and Building Materials. 2019. Vol. 215. Pp. 73–89. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.146.
17. Kholodnyak M.G., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Tret'yakov D.A., Dao V.N., Zaikin V.I. Proposals for the calculation of the strength characteristics of vibrated, centrifuged and vibrocentrifuged concrete [Predlozheniya po raschetnomu opredeleniyu prochnostnykh karakteristik vibrirovannykh, centrifugirovannykh i vibrocentrifugirovannykh betonov]. The Eurasian Scientific Journal. 2018. No. 6. AdobeAcrobatReader. URL: <https://esj.today/PDF/66SAVN618.pdf> (date of treatment: 07.10.2020). (rus)
18. Mailyan L.R., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Kholodnyak M.G. Determination and use of hidden strength reserves of centrifuged reinforced constructions by means of calculation and experimental methods. Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2020. No. 1(45). Pp. 6–14. DOI: 10.25987/VSTU.2020.45.1.001.
19. Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Shuyskiy A.I., Nazhnev M.P. Theoretical and Practical Aspects of the Formation of the Variational Structure of Centrifuged Products from Heavy Concrete. Materials Science Forum. 2018. Vol. 931. Pp. 502–507. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.502.

20. Shuyskiy A.I., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Kholodnyak M.G. Investigation of the influence of the initial composition of heavy concrete designed for the manufacture of ring-section products on its properties. *Materials Science Forum*. 2018. No. 931. Pp. 508–514. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.508.

21. Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Zholobova O.A. Prescription and Technological Aspects of Manufacturing High-Quality Centrifuged Products and Structures from Heavy Concrete. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018. Vol. 463. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.508.

*Information about the authors*

**Mailyan, Levon R.** DSc. Professor. E-mail: lrm@aaanet.ru. Don State Technical University. Russian Federation, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1.

**Stel'makh, Sergei A.** PhD. E-mail: sergej.stelmax@mail.ru. Don State Technical University. Russian Federation, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1.

**Shcherban', Evgenii M.** PhD. E-mail: au-geen@mail.ru. Don State Technical University. Russian Federation, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1.

**Dotsenko, Natal'ya A.** Student. E-mail: natalya\_1998\_dotsenko@mail.ru. Don State Technical University Russian Federation, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1.

---

*Received 25.10.2020*

**Для цитирования:**

Маилян Л.Р., Стельмах С.А., Щербань Е.М., Доценко Н.А. Особенности расчета центрифугированных и виброцентрифугированных железобетонных конструкций по дифференциальным конструктивным характеристикам бетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 12. С. 32–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-12-32-46

**For citation:**

Mailyan L.R., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Dotsenko N.A. Features of calculation of centrifuged and vibro-centrifuged reinforced concrete structures by differential construction characteristics of concrete. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020. No. 12. Pp. 32–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-12-32-46