

SCAD USER DAYS 2021

Расчет и проектирование конструкций в среде SCAD Office 21

К расчету железобетонных плит
на поперечные силы и продавливание



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

**СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

www: mgsu.ru/universityabout/Struktura/Kafedri/ZhBK/

e-mail: gbk@mgsu.ru; dpekin@mail.ru

тел.: +7 495 287 49 14 доб. 3036, 3084

Пекин Дмитрий Анатольевич, доцент, к.т.н.

Расчет плит на действие поперечных сил

Согласно п. 8.1.55 СП 63.13330 следует выполнять по формуле:

$$\frac{Q_x}{Q_{x,ult}} + \frac{Q_y}{Q_{y,ult}} \leq 1$$

где Q_x и Q_y – поперечные силы, действующие по боковым сторонам плоского выделенного элемента

$Q_{x,ult}$ и $Q_{y,ult}$ – предельные поперечные силы, воспринимаемые плоским выделенным элементом и вычисляемые по формуле:

$$Q_{ult} = Q_b + Q_{sw}$$

где Q_b и Q_{sw} – предельные поперечные силы, воспринимаемые соответственно бетоном и поперечной арматурой

Предельные поперечные силы

Воспринимаемые бетоном и поперечной арматурой вычисляются по формулам:

$$Q_b = 0,5R_{bt}bh_0$$

$$Q_{sw} = q_{sw}h_0 = \frac{R_{sw}A_{sw}}{s_w}h_0$$

где b и h_0 – ширина и рабочая высота сечения, соответственно

q_{sw} – интенсивность поперечного армирования

A_{sw} и s_w – площадь поперечной арматуры расположенной в одном нормальном сечении и шаг этих рядов, соответственно

R_{bt} и R_{sw} – сопротивление бетона и поперечной арматуры растяжению, соответственно

Расчет на действие поперечных сил

До выхода СП 63.13330.2012 либо не выполнялся, либо выполнялся по аналогии с расчетом стержневых элементов по формулам:

$$\frac{Q_x}{Q_{x,ult}} \leq 1 \quad \text{и} \quad \frac{Q_y}{Q_{y,ult}} \leq 1$$

Но при этом в зонах максимальных значений поперечных сил Q_x или Q_y выполнялся расчет на продавливание по формуле:

$$F \leq F_{b,ult} + F_{sw,ult}$$

где F – сосредоточенная сила от внешней нагрузки

$$F_{b,ult} = R_{bt}A_b = \frac{R_{bt}u(h_{0x} + h_{0y})}{2} \quad \text{и} \quad F_{sw,ult} = 0,8q_{sw}u = \frac{0,8R_{sw}A_{sw}u}{s_w} \leq F_{b,ult}$$

$F_{b,ult}$ и $F_{sw,ult}$ – предельные усилия, воспринимаемые бетоном и арматурой

u – периметр основания условной **призмы** (или **пирамиды** в уровне $h_0/2$)

Частный случай расчета согласно п. 8.1.55 СП 63.13330

При равенстве $Q_{x,ult} = Q_{y,ult} = Q_{ult}$ и $Q_x = Q_y = Q$ приводит к условию:

$$\frac{Q_x}{Q_{x,ult}} + \frac{Q_y}{Q_{y,ult}} = \frac{Q}{Q_{ult}} + \frac{Q}{Q_{ult}} = \frac{2Q}{Q_{ult}} \leq 1$$

Следовательно, в данном случае **предельная** поперечная сила, воспринимаемая плоским выделенным элементом, должна быть больше **удвоенной** поперечной силы, действующей по боковой стороне элемента в любом из направлений, что приводит к возникновению **двукратного** запаса несущей способности относительно рассмотрения по отдельным направлениям

Данное требование совместно с **эмпирическим** подходом в определении предельной силы по бетону приводит к несоответствию физической природе механизма разрушения по поперечной силе и неоправданному резерву несущей способности, прошедшего проверку временем (до 2012 года)

Альтернативный расчет плит по поперечной силе

В работе [1] предлагается выполнять по аналогии с формулой в п. 7.39 СНиП II-V.1-62:

$$\left(\frac{Q_x}{Q_{x,ult}}\right)^2 + \left(\frac{Q_y}{Q_{y,ult}}\right)^2 \leq 1$$

Тогда в случае $Q_{x,ult} = Q_{y,ult} = Q_{ult}$ и $Q_x = Q_y = Q$ получим условие:

$$\left(\frac{Q_x}{Q_{x,ult}}\right)^2 + \left(\frac{Q_y}{Q_{y,ult}}\right)^2 = \frac{Q^2}{Q_{ult}^2} + \frac{Q^2}{Q_{ult}^2} = \frac{2Q^2}{Q_{ult}^2} \leq 1,$$

при котором, **квадрат предельной** поперечной силы, воспринимаемой плоским выделенным элементом, должен быть больше **удвоенного** квадрата поперечной силы, действующей по боковой стороне элемента в любом из направлений, что приводит к возникновению запаса несущей способности, равного **41%** относительно рассмотрения по отдельным направлениям

Альтернативное предложение по расчету

В работе [2] связано с учетом **результующей** поперечных сил в элементе и необходимости рассмотрения поперечной арматуры, распределенной на площади рассчитываемого элемента (одного количества арматуры для двух направлений), что приводит к следующим преобразованиям:

$$\frac{\sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}}{Q_{ult,min}} \leq 1$$

Или с учетом результирующей бетона по двум направлениям и общего количества поперечной арматуры:

$$\frac{\sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}}{\sqrt{Q_{bx}^2 + Q_{by}^2 + Q_{sw}}} \leq 1$$

Расчет согласно СНиП 2.03.01-84* и Еврокод 2

Не содержится требований и специальных методик расчета для железобетонных плит на действие поперечных сил в СНиП 2.03.01-84*

И согласно п. **5.26** СНиП 2.03.01-84* в сплошных плитах независимо от высоты допускается не устанавливать поперечную арматуру, при обеспечении требований расчета согласно указаний п. **3.32** (расчет железобетонных элементов без поперечной арматуры на действие поперечной силы для обеспечения прочности по **наклонной** трещине), за исключением зон, в которых возможна реализация продавливания

Не содержится подобных указаний и в Еврокод 2

Проблема подбора поперечной арматуры

Возникает при использовании действующей нормативной методики расчета и МКЭ при задании сосредоточенных (узловых) сил P и определении значений поперечных сил Q на основе теории Кирхгофа-Лява – на примере известного решения изгиба **кольцевой** пластинки **свободно** опертой по контуру:

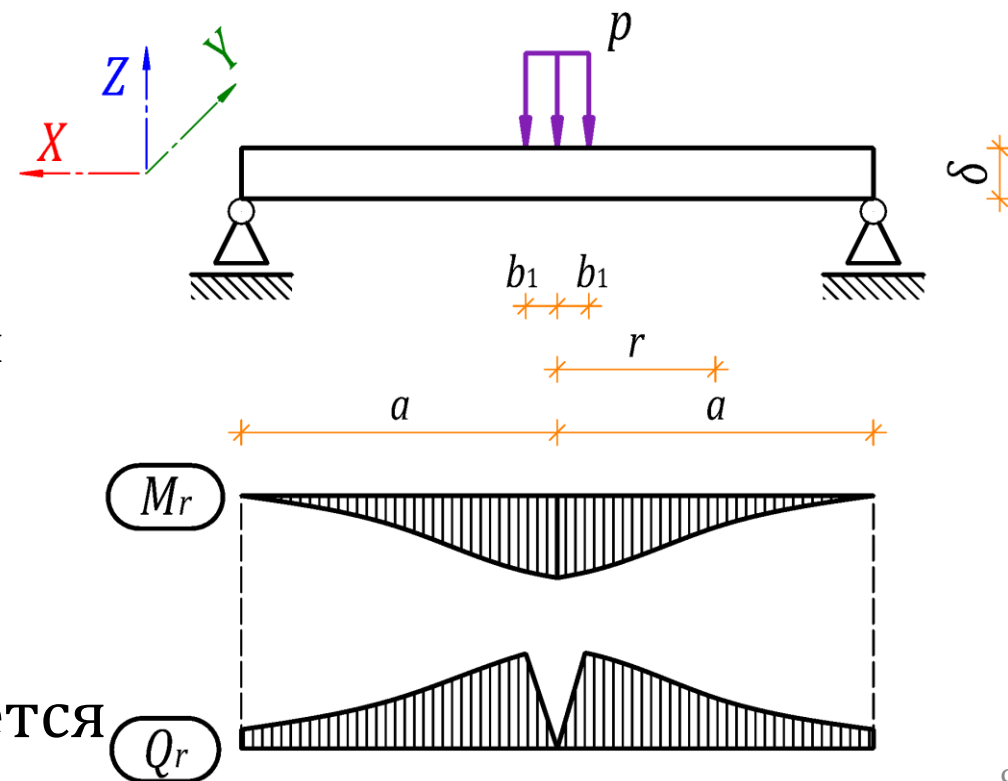
$$M_r = -\frac{p}{4\pi} \cdot (1 + \nu) \cdot \ln \frac{r}{a} \quad \text{и} \quad Q_r = -\frac{p}{2\pi a} \cdot \frac{a}{r}$$

где M_r и Q_r – радиальные изгибающий момент и поперечная сила; p – давление; a и b_1 – радиусы пластинки и области приложения давления p ; ν – коэффициент Пуассона; δ – толщина пластинки

при $b_1 \rightarrow 0$ и $r \leq b_1 \Rightarrow \ln \frac{r}{a} \rightarrow -\infty$ и $M_r \rightarrow \infty$

при $b_1 \rightarrow 0$ и $r \leq b_1 \Rightarrow \frac{a}{r} \rightarrow \infty$ и $Q_r \rightarrow -\infty$

В результате – требуемая площадь поперечной арматуры заметно увеличивается

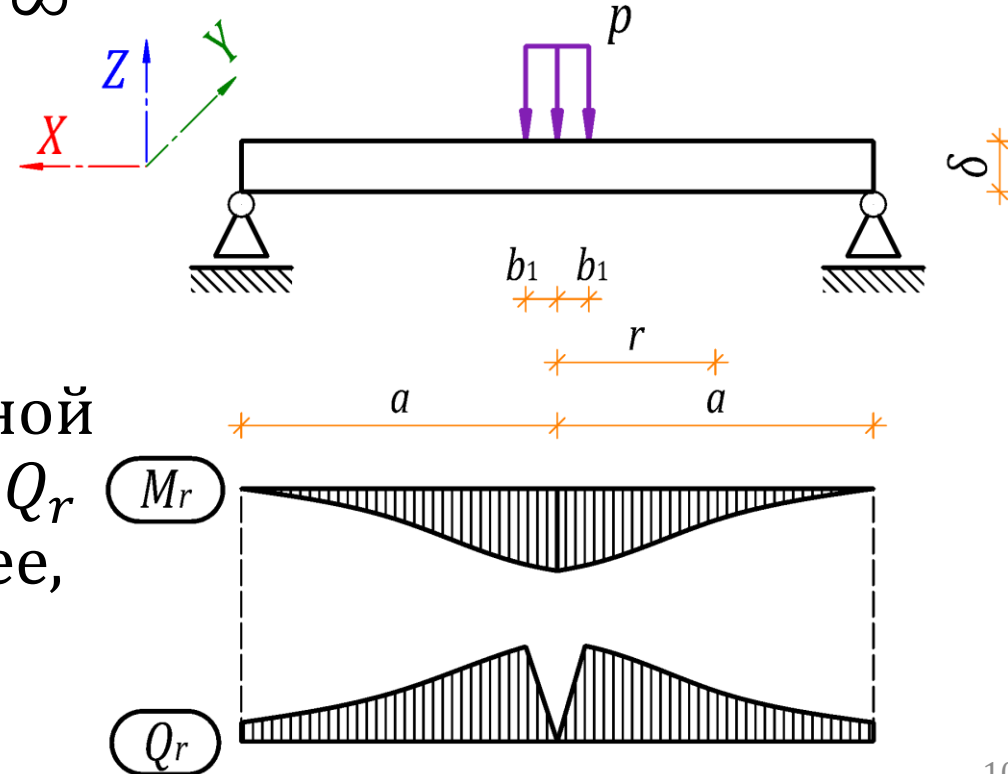


Сравнение порядков бесконечно больших величин M_r и Q_r

Можно выполнить путем нахождения предела отношения на основе правила Лопиталья-Бернулли для раскрытия неопределенностей:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\frac{a}{r}}{-\ln \frac{r}{a}} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\left(\frac{a}{r}\right)'}{\left(-\ln \frac{r}{a}\right)'} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\frac{-a}{r^2}}{\frac{-1}{a \frac{r}{a}}} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{a}{r} = \infty$$

Значит при $r \rightarrow 0$ отношение a/r это бесконечно большая величина более **высокого** порядка по сравнению с величиной $\ln(r/a)$ и, следовательно, поперечная сила Q_r стремится к бесконечности гораздо быстрее, чем изгибающий момент M_r



Современные теоретические исследования

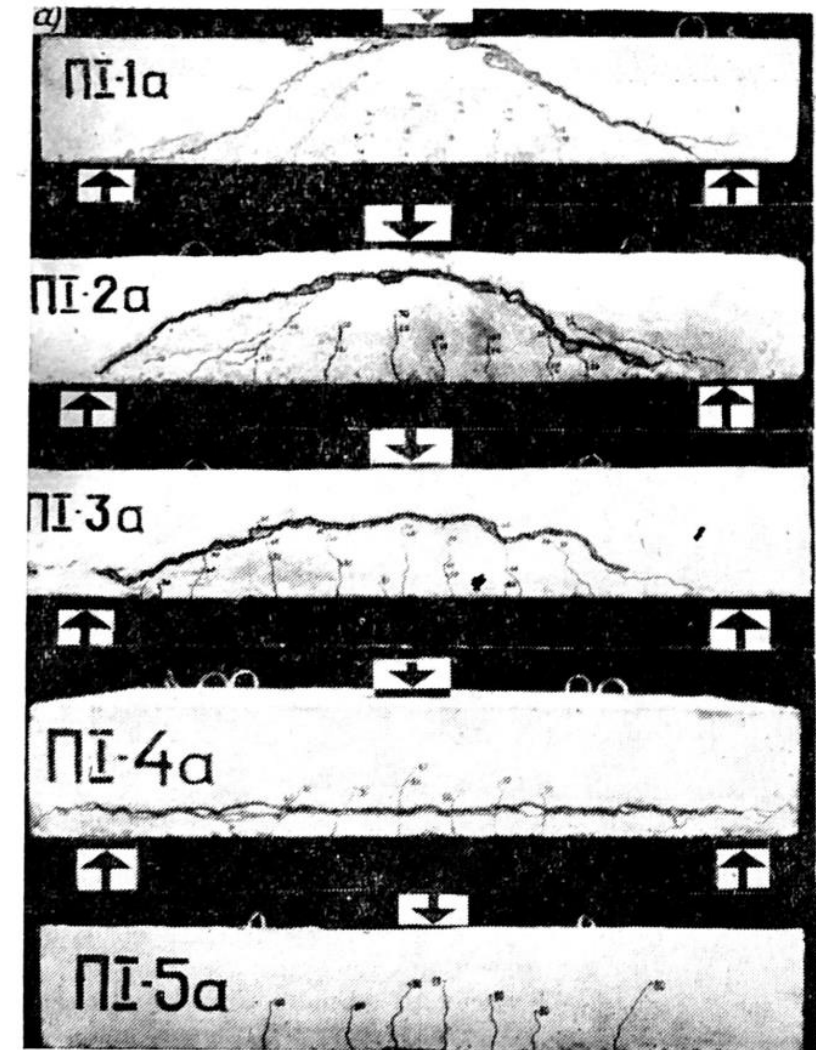
И предложения по совершенствованию методики расчета на продавливание в работах [3, 4] продолжают традиционное направление и используют классические допущения при расчете на продавливание в виде **отсутствия главных наклонных трещин** и возможности **равномерного распределения сдвигающих усилий** по наклонной грани пирамиды продавливания, что приводит к следующим противоречиям:

- При определении несущей способности на продавливание выполняется суммирование несущей способности по бетону на **I стадии НДС** (в отсутствии трещин) и несущей способности по поперечной арматуре на **III стадии НДС** (с наличием трещин)
- Допущение о **равномерном** распределении напряжений сдвига по наклонным граням пирамиды продавливания имеет некоторые ограничения, поскольку относительные деформации **удлинения** бетона крайне **малы**, и не позволяют на практике развиваться такому **равномерному распределению** напряжений

Экспериментальные исследования 1980 г. в НИИЖБ

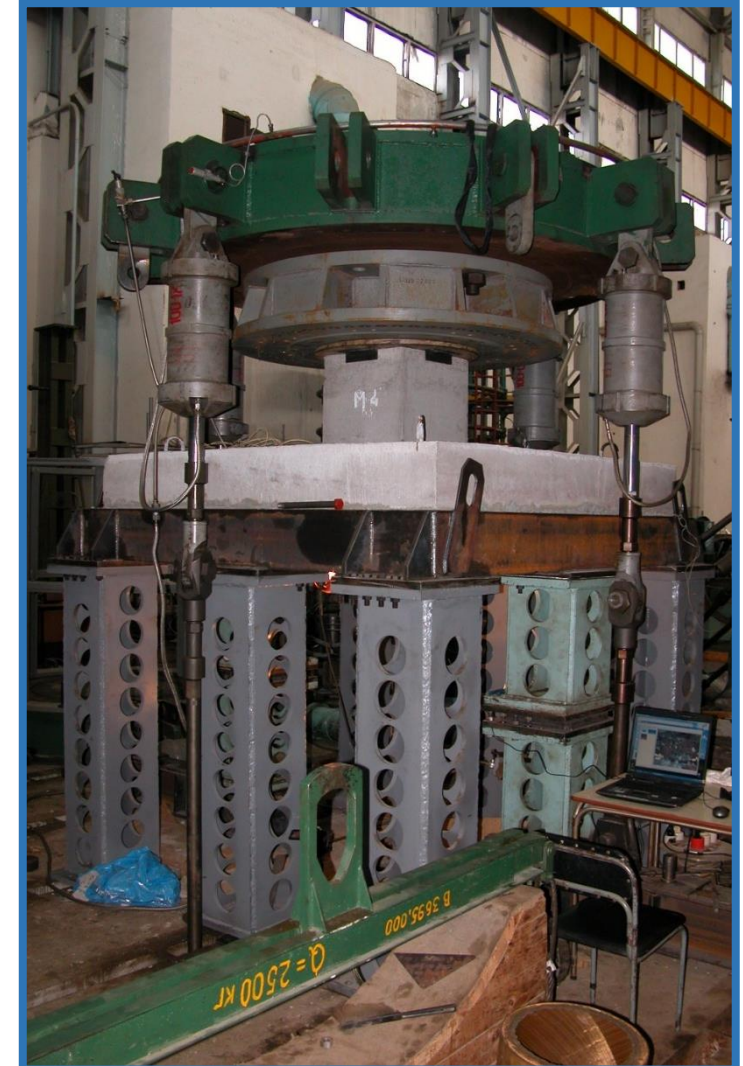
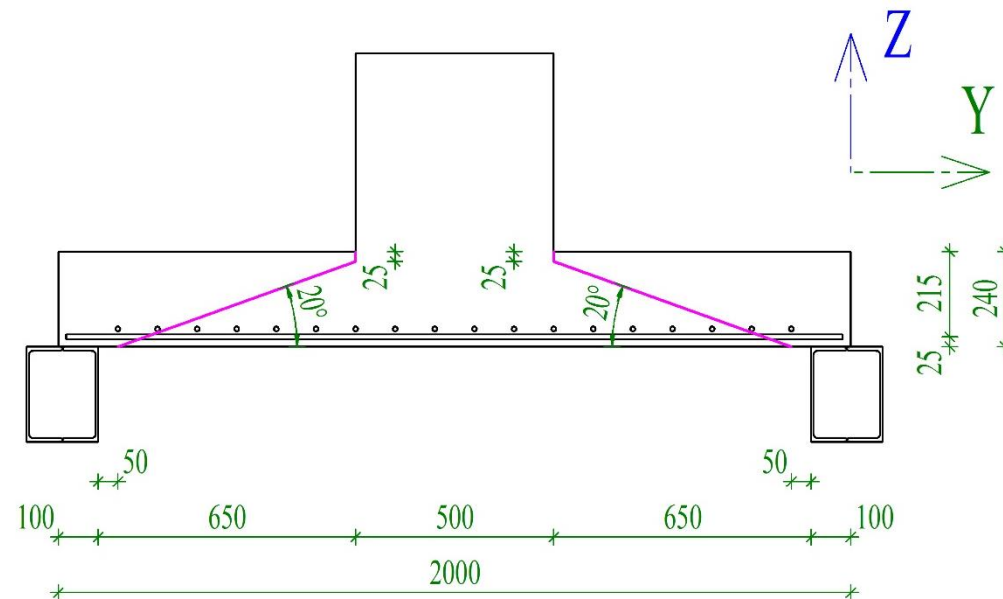
По сравнению механизмов разрушения от действия поперечных сил и при продавливании [5] проводились для поиска переходных форм, позволяющих выработать критерии применения той или иной методики расчета

Испытывались образы, опёртые по **двум** сторонам на пролете **1,4 м**, высотой **300 мм**, с грузовой площадкой **200×200 мм** в середине пролета (т. о. пролет среза составлял **0,6 м**), при варьировании их ширины кратно габариту грузовой площадки – **200** (ПІ-1а), **3×200** (ПІ-2а), **5×200** (ПІ-3а) и **7×200** (ПІ-4а) мм, а также контрольные образцы с габаритами **1,4×1,4×0,3(h)** м (ПІ-5а), опёртые по 4-м сторонам, для реализации чистого продавливания



Современные экспериментальные исследования

В области продавливания [6] подтверждают существенные отличия фактического механизма разрушения относительно принятых расчетных предпосылок в нормах СНиП 2.03.01-84* и СП 63.13330.2018, а также общую природу с разрушением по наклонным сечениям



Пирамида продавливания в реальных конструкциях

При действии равномерно распределенных нагрузок образуется с углом главных наклонных трещин близким к 45°

Это подтверждается конкретным примером аварийного разрушения плиты покрытия стилобатной части здания в месте сопряжения с колонной на объекте в Москве рядом с Павелецким вокзалом в 2009 году

Тогда на этапе разработки рабочей документации новой проектной организацией были внесены изменения в первоначальный проект в виде **исключения** капителей и **уменьшения** сечения колонн



Выводы:

- На основе анализа приведенных экспериментальных данных можно констатировать, что разрушение плит при действии поперечных сил и от продавливания имеет **родственную** природу и **схожий** механизм благодаря образованию и развитию **главных наклонных** трещин
- Нормативная методика расчета согласно требований п. 8.1.55 СП 63.13330.2018 на действие поперечных сил обладает существенным резервом по несущей способности и может приводить к необходимости **усиления** не затрагиваемых в процессе реконструкции зданий и сооружений железобетонных плит, возведенных до 2012 года
- В сложившейся ситуации и текущих объемах строительства с применением монолитного железобетона создание **единой** и **универсальной** методики расчета железобетонных плит на действие поперечных сил и продавливание является актуальной задачей

Список литературы

1. Иванов, А. Развитие теории и прикладных методов оценки силового сопротивления монолитных гражданских зданий с учетом нелинейности деформирования / А. Иванов : автореф. дис. ... докт. тех. наук : Иванов Акрам. – М., 2008. – 44 с.
2. Карпенко, С.Н. О современных методах расчета высотных зданий из монолитного железобетона / С.Н. Карпенко // Журнал «Высотные здания». №3. 2007. – С.34-39.
3. Карпенко, Н.И. К построению общей методики расчёта железобетонных плит на продавливание с учетом влияния моментов / Н.И. Карпенко, С.Н. Карпенко // Вестник МГСУ. №3. 2011. – С.86-91.
4. Карпенко, Н.И. Практическая методика расчета железобетонных плит на продавливание по различным схемам / Н.И. Карпенко, С.Н. Карпенко // Бетон и железобетон. №5. 2012. – С.10-16.
5. Гвоздев, А.А. Переходные формы между разрушением по наклонному сечению и продавливанием / А.А. Гвоздев, А.С. Залесов, К.Е. Ермуханов // Бетон и Железобетон. №3. 1980. – С.27-29.
6. Пекин, Д.А. Влияние изгиба на механизм продавливания опорной зоны железобетонной плиты / Д.А. Пекин // Промышленное и гражданское строительство. №10. 2019. – С.20-28.
7. Пекин, Д.А. К расчету железобетонных плит на поперечные силы и продавливание / Д.А. Пекин // Строительство и застройка: жизненный цикл – 2020 : материалы V Междунар. (XI Всерос.) конф. (Чебоксары, 25–26 ноября 2020 г.). – Чебоксары: ИД «Среда», 2020. С.157-166.