
О применимости двучленного закона трения Дерягина к вопросам совместного деформирования разновозрастных бетонов в сборно-монолитных конструкциях

А.А. Коянкин¹, В.М. Митасов²

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск

²Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация: Рассматриваются вопросы совместного деформирования монолитного и сборного бетонов в сборно-монолитных конструкциях. Определены стадии напряжённо-деформированного состояния контактного шва сопряжения в ходе его загрузки. Предложена методика расчёта контактного шва, выполненная на основании двучленного закона трения Дерягина, и учитывающая как силы трения, так и силы адгезии, а также включение в процесс деформирования поперечной арматуры. На основании работ проф. Дерягина Б.В. предложено применение единого «истинного» коэффициента трения для сил трения и адгезии. Приведены обоснования, основанные на экспериментальных исследованиях различных учёных, возможности применения двучленного закона трения в отношении вопросов совместного деформирования монолитного и сборного бетонов на 1-ой стадии напряжённо-деформированного состояния.

Ключевые слова: сборно-монолитные конструкции, контактный шов, несущая способность, трение, адгезия, прочность, двучленный закон трения, сборный бетон, монолитный бетон.

Надёжность контактного шва в сборно-монолитных конструкциях является главным фактором, обеспечивающим совместность деформирования сборного и монолитного бетонов разного возраста, а, порой, и прочности, и вида. В работе [1] проф. Гвоздев А.А., а также другие учёные в своих трудах [2-4] практически единодушно отмечают, что на прочность контактного шва влияет большое количество составляющих, причём некоторые из них достаточно сложно прогнозируемые. Анализ научных работ и собственные исследования позволили авторам статьи выделить составляющие контактного шва, влияющие на процесс его деформирования:

- силы адгезии и трения, зависящие от качества обработки поверхности сборного бетона, включающей очистку от пыли и цементного «молочка», устройство насечки, смачивание, нанесение цементного раствора;

- усилия обжатия, повышающие силы трения;

- поперечная арматура;
- ряд других факторов.

Процесс деформирования контактного шва сборно-монолитных конструкций можно разделить на «классические» стадии напряжённо-деформированного состояния (далее НДС) следующим образом:

- стадия 1 – с начала загрузки и до момента образования продольной трещины. Характеризуется касательными напряжениями τ меньшими предельных касательных напряжений по образованию продольной трещины τ_{crc} , т.е. $\tau < \tau_{crc}$;

- стадия 1а – в предельном состоянии стадии 1 достигнуты предельные значения напряжения τ_{crc} , что является пограничным состоянием перед образованием продольной трещины и «переходом» конструкции в стадию 2;

- стадия 2 – начинается с образования продольной трещины, отделяющей монолитный бетон от сборного и приводящей к взаимному смещению поверхностей монолитного и сборного бетонов. Стадия 2 характеризуется касательными напряжениями τ меньшими предельных касательных напряжений по несущей способности τ_u , т.е. $\tau < \tau_u$;

- стадия 2а – в предельном состоянии стадии 2 достигнуты предельные значения напряжений τ_u , что является пограничным состоянием перед исчерпанием несущей способности контактного шва на сдвиг и «переходом» конструкции в стадию 3;

- стадия 3 – разрушение конструкции контактного шва.

В рамках данной статьи рассмотрены вопросы совместного деформирования монолитного и сборного бетонов на 1-ой стадии, где отсутствует взаимное смещение монолитного и сборного бетонов за счёт сил адгезии и трения между бетонами. Рассматривая данную стадию, возможно

провести аналогии с известным понятием физики – «трение покоя» – характеризующим минимальное значение усилия, необходимое для приведения тела в движение. Данное усилие, в свою очередь, зависит от сил трения и адгезии. В дальнейшем уместно будет обратиться к работе известного учёного в области физической химии проф. Дерягина Б.В. [5], который обозначил взаимосвязь между силами трения и адгезии, указав, что «... силы трения, помимо молекулярной шероховатости, зависят от сил атомно-молекулярного взаимодействия», а также указал, что «... молекулярные силы притяжения будут иметь такое же действие на сопротивление скольжению F , как если бы вес тела увеличился на величину этой силы». В итоге проф. Дерягиным Б.В. была предложена зависимость:

$$F = \mu(N + N_0) = \mu(N + S_0 p_0), \quad (1)$$

где F – предельная сдвигающая сила; μ – истинный коэффициент трения; N – сила внешней нагрузки, действующая на плоскость сдвига перпендикулярно к ней; $N_0 = S_0 p_0$ – равнодействующая сил молекулярного притяжения тел; S_0 – площадь действительного контакта; p_0 – сила молекулярного притяжения, действующая на единицу площади действительного контакта.

В отношении сборно-монолитных конструкций площадь действительного контакта S_0 , определяемая выступами на поверхности твёрдых тел, будет примерно равна площади номинального контакта S (т.к. в процессе вибрирования бетонная смесь достаточно плотно примкнёт к сборной части), то есть $S_0 \approx S$. В итоге уравнение (1) преобразуется к виду:

$$\tau_{crc} = \mu(p + p_0), \quad (2)$$

где $\tau_{crc} = \frac{F}{S}$ – предельная величина касательных напряжений на сдвиг;

$p = \frac{N}{S}$ – давление, действующее перпендикулярно на плоскость сдвига.

В работе [6] проф. химии Зимона А.Д. приведено графическое изображение (рис. 1, а) действия зависимости (2), как с учётом, так и без учёта сил адгезии.

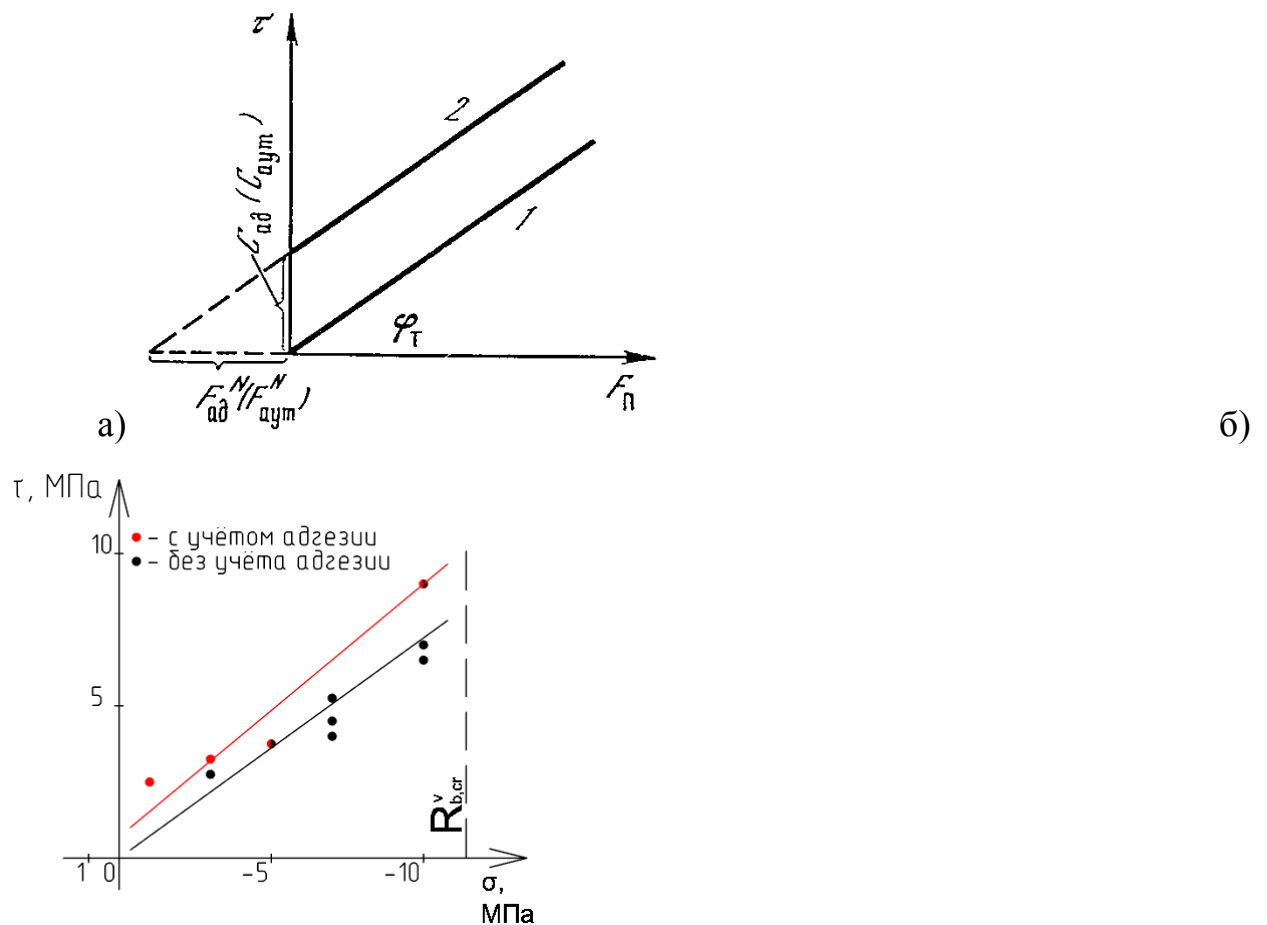


Рис. 1. – Зависимости предельного напряжения сдвига от нормального давления: а – Графическое представление [6] без учёта сил адгезии $F_{ад}$ (1) и с учётом сил адгезии $F_{ад}$ (2); б – на основе работы [7] с учётом и без учёта сил адгезии

Действительность двучленного закона трения была неоднократно подтверждена работами учёных физиков [5, 6] на различных материалах.

Вывод о применимости данного закона к сборно-монолитным конструкциям, авторами статьи был сделан на основании исследований различных учёных в области строительства. К примеру, на основании экспериментальных данных работы [7] построен график (рис. 1, б) зависимости предельного сдвига от сил обжатия, выполненных как с учётом сил адгезии, так и без них.

Зависимости предельных напряжений сдвига и усилий обжатия, построенные на основании работы [1] проф. Гвоздева А.А. (рис. 2, а) также являются линейными. График (рис. 2, б), построенный на основании работы [8], где интенсивность нормального давления в том числе превысила верхний предел трещинообразования $R_{b,cr}^v$, позволяет отметить следующее:

- до $R_{b,cr}^v$ соблюдается линейная зависимость предельного напряжения сдвига от величины нормального давления;

- после достижения и последующего превышения значения $R_{b,cr}^v$ зависимость перестаёт быть линейной. Действительно, после «перехода» через верхнюю границу микротрещинообразования в бетоне начинается разуплотнение и образование макротрещин, что неизбежно приводит к ухудшению качества связи бетонов. Аналогичный эффект был обнаружен и в работах [7, 9].

Непосредственно линейные зависимости $\tau \sim \sigma$ отмечаются самостоятельно авторами работ [9-11].

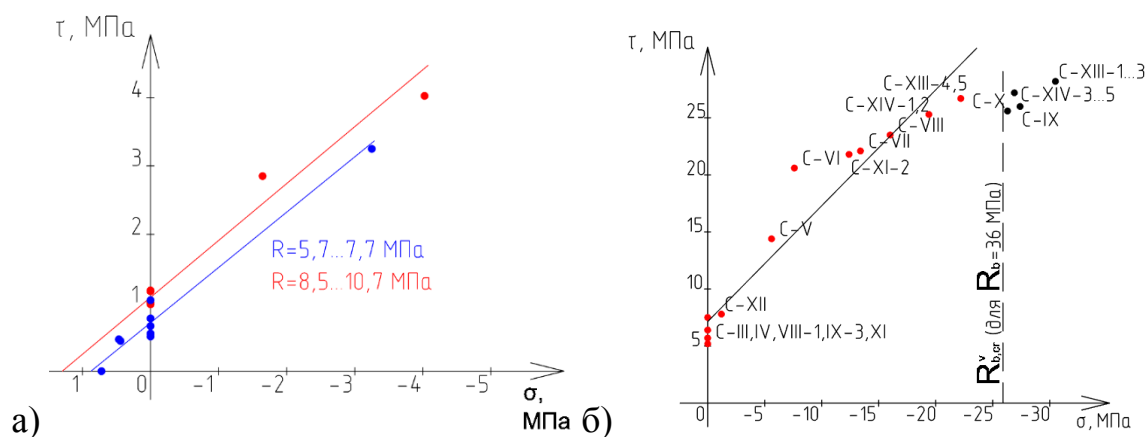


Рис. 2. – Зависимости предельного напряжения сдвига от нормального давления: а – на основе работы [1]; б – на основе работы [8]

На основании вышеозначенного можно заявить о применимости двучленного закона трения, предложенного проф. Дерягиным Б.В., к вопросам совместного деформирования сборного и монолитного бетонов в сборно-монолитных конструкциях, но со следующими оговорками:

- в случае обеспечения сцепления только лишь за счёт сил адгезии и трения, стадия 1а является предельной, как по образованию трещин, так и по несущей способности, т.е. $\tau = \tau_{crc} \approx \tau_u$;

- предельные касательные напряжения τ_{crc} определяются, как:

$$\tau(\sigma)_{crc} = -\gamma_{тр} \sigma_c + R_{b,sh}^{\text{III}} \quad (3)$$

где σ_c – вертикальные напряжения обжатия по контактному шву от внешней нагрузки; $R_{b,sh}^{\text{III}}$ – касательные напряжения, соответствующие чистому сдвигу по контактному шву; $\gamma_{тр} = \text{tg} \alpha$ – коэффициент истинного трения.

- график зависимости $\tau \sim \sigma$ (рис. 3) принимается с учётом общепринятых для строительных конструкций знаков: – растяжение «+», сжатие «-»;

- диапазон «действия» закона примем от $\sigma = 0$ (т.к. экспериментальных данных, оценивающих одновременное действие усилий растяжения и сдвига недостаточно, а также такая комбинация усилий не является характерной для подавляющего большинства строительных конструкций) до $\sigma = R_{b,cr}^v$ (т.к., как показали экспериментальные данные работ [7-9], линейная зависимость перестаёт соблюдаться при напряжениях выше $R_{b,cr}^v$).

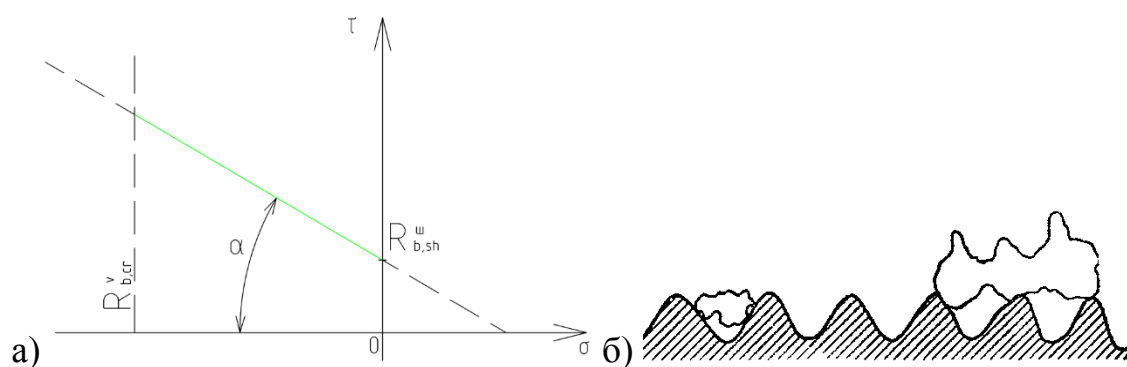


Рис. 3.а – зависимость предельного напряжения сдвига от нормального давления; б – схема контакта частиц с обработанной поверхностью [6].

Как отмечено в работах учёных в сфере физики [5, 6] значение коэффициента истинного трения не зависит от наличия сил адгезии и определяется только качеством выполнения поверхностей. Аналогичные выводы можно сделать и на основании экспериментальных данных, приведённых в работе [7], где помимо испытания на сдвиг образцов монолитного и сборного бетонов, «склеенных» между собой за счёт сил адгезии, проведены испытания на сдвиг этих же образцов, но после исчерпания несущей способности сил адгезии (рис. 1, б). В итоге значение $\gamma_{тр}$ можно принять на основании работ [1, 7, 8] в диапазоне $\gamma_{тр} = 0,5 \dots 0,9$. Т.к. качество обработки поверхности сборного бетона зависит во многом от конкретного завода-изготовителя и применяемой им опалубки, а также

квалификации монтажников, то логично под каждые условия строительства и применяемые конструкции $\gamma_{тр}$ устанавливать его индивидуально.

Проф. Гвоздев А.А. в работе [1] указал, что прочность контактного шва возрастает с увеличением прочности монолитного бетона. При этом увеличение прочности сборного бетона не сильно отражается на несущей способности контактного шва. В работах других авторов [11, 12] также указано на эту закономерность, объяснить которую возможно следующей логикой: поверхность сборного бетона проходит качественную обработку, что в итоге оставляет на ней неровности, образованные только лишь твёрдыми и жёсткими составляющими (цементный камень, частицы песка и края крупного заполнителя). При этом цементный камень из всех составляющих является наиболее слабым местом. В последующем, в процессе укладки на строительной площадке, в «пазы» обработанной поверхности попадает именно цементный камень монолитного бетона, а не более прочные частицы песка и края крупного заполнителя. В работе проф. химии Зимона А.Д. [6] графически показана особенность контакта более крупных частиц неправильной формы и шероховатой поверхности (рис. 3, б), где чётко видна сложность качественного сопряжения частиц с существующими «пазами». Кроме того, в ходе укладки монолитного бетона возможно образование пустот, заполненных воздухом в неровностях сборного бетона, что приводит к снижению сил адгезии и уменьшению высоты «зуба» цементного камня монолитного бетона. В итоге логично предположить, что прочность контактного шва будет определяться, помимо качества обработки поверхности сборного бетона (характеризующейся $\gamma_{тр}$), ещё и прочностью цементного камня монолитного бетона на срез. В результате значение $R_{b,sh}^{III}$ будем вести в привязке к прочности монолитного бетона на срез:

$$R_{b,sh}^{\text{ш}} = \gamma_{b,sh} * R_{b,sh}^{\text{м}}, \quad (4)$$

где $\gamma_{b,sh} = 0,8$ – коэффициент, определяемый на основании экспериментальных данных, и показывающий соотношение прочностей контактного шва и монолитного бетона на срез; $R_{b,sh}^{\text{м}}$ – сопротивление монолитного бетона срезу.

Учитывая, что несущая способность контактного шва обеспечивается прочностью цементного камня монолитного бетона, влияющей, в свою очередь, как на прочность бетона на растяжение, так и на сжатие, то логично принять зависимость прочности монолитного бетона на срез $R_{b,sh}^{\text{м}}$ одновременно от прочностей на растяжение $R_{bt}^{\text{м}}$ и на сжатие $R_b^{\text{м}}$. В этой связи значение $R_{b,sh}^{\text{м}}$ можно определить, к примеру, на основании данных работы проф. Голышева А.Б. [13]:

$$R_{b,sh}^{\text{м}} = k\sqrt{R_b^{\text{м}}R_{bt}^{\text{м}}}, \quad (5)$$

где k – коэффициент, изменяющийся (в зависимости от вида и класса бетона) в диапазоне 0,5...1.

В работах [9, 14, 15] приведены данные результатов исследований влияния поперечной арматуры на сдвиг, где указано, что «... горизонтальные (тангенциальные) перемещения, действующие вдоль шероховатой поверхности, вызывают появление вертикальных перемещений, т.е. провоцируют раскрытие начальной трещины нормального отрыва. В свою очередь, развитие вертикальных перемещений приводит к растяжению арматуры, пересекающей трещину, а как следствие – к повышению сжимающих напряжений в плоскости контакта...». При этом, как показали исследования, приведённые в работах [9, 15] с применением гибких втулок или пористой резины на поперечной арматуре, доля влияния нагельного

эффекта оказывается незначительной. В итоге поперечную арматуру, перед образованием продольной трещины, следует рассматривать как фактор, приводящий к дополнительному обжатию, что приведёт формулу (3) к следующему виду:

$$\tau(\sigma)_{crc} = \gamma_{тр}(-\sigma_c + \mu\sigma_{sw,crc}) + R_{b,sh}^{\text{III}} \quad (6)$$

где μ – коэффициент армирования поперечной арматурой;

$\sigma_{sw,crc}$ – предельные напряжения в поперечной арматуре, соответствующие образованию продольной трещины по контактному шву.

Значение $\sigma_{sw,crc}$ зависит от предельной растяжимости контактного шва в поперечном направлении $\varepsilon_{bt,sh}^{\text{III}}$, величина которой зависит от индивидуальных характеристик шва и должна уточняться аналогично $\gamma_{тр}$ отдельно для каждой строительной конструкции.

На основании вышеприведённых исследований можно сделать следующие выводы:

- между предельными напряжениями сдвига по шву и действующими напряжениями вертикального обжатия наблюдается линейная зависимость;
- деформирование контактного шва сборно-монолитной конструкции можно описать двучленным законом деформирования Дерягина;
- диапазон применимости двучленного закона ограничивается напряжениями обжатия от нуля до верхней границы микротрещинообразования монолитного бетона.

Литература

1. Гвоздев А.А., Васильев А.П., Дмитриев С.А. В стыках сборных железобетонных конструкций и рабочих швах // Изучение сцепления нового

бетона со старым: Москва. Онти. Глав. ред. строит. лит-ры, 1936 (школа ФЗУ треста «Полиграфкнига»). С. 29-47.

2. Koyankin A.A., Mitasov V.M., Tskhay T.A. Compatibility of precast heavy and monolithic lightweight concretes deforming. Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 8(84). Pp. 162–172.

3. Евстифеев В.Г. Экспериментально-теоретические исследования соединений сборных оболочек. Автореферат дисс. канд. тех. наук, Ленинград, 1967. 23 с.

4. Кремнева Е.Г., Хаменок Е.В. Контактные швы в железобетонных составных конструкциях // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. Строительные конструкции. 2011. №8. С. 48-53.

5. Дерягин Б.В. Что такое трение? Москва : Издательство академии наук СССР, 1963. 234 с.

6. Зимон А.Д. Что такое адгезия. М.: Наука, 1983. 176 с.

7. Коровин Н.Н., Голосов В.Н. Экспериментальное определение коэффициента трения на контакте сборного и монолитного бетона // Совершенствование стыков железобетонных конструкций. НИИЖБ, 1987, с. 30-36.

8. Петров А.Н. Экспериментальное исследование бетона при нагружении сжатием и срезом // Бетон и железобетон, 1965, №11. с. 34-37.

9. Ашкинадзе Г.Н., Соколов М.Е., Мартынова Л.Д., Лишак В.И., Тассиос Ф., Цукантас С., Плайпис Н., Скарнас А. Железобетонные стены сейсмостойких зданий: Исследования и основы проектирования – М.: Стройиздат, 1988. 499 с.

10. Скворцов А.Г. Соппротивление контактных швов железобетонных конструкций при действии сдвигающих сил: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. М., 2000. 137 с.

11. Сунгатуллин Я.Г. Экспериментально-теоретические основы расчёта сопротивляемости сдвигу армированного и неармированного контактов сборно-монолитных конструкций // Сборные и сборно-монолитные конструкции: сборник научных трудов. Казань. С. 90-146.

12. Кремнева Е.Г., Хаменок Е.В. Контактные швы в железобетонных составных конструкциях // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, 2011. С. 48-52.

13. Голышев А.Б., Бачинский В.Я., Полищук В.П., Харченко А.В., Руденко И.В. Проектирование железобетонных конструкций: Справочное пособие. – К.: Будивэльник, 1990. 544 с.

14. Холмянский М.М. Бетон и железобетон: Деформативность и прочность. – М.: Стройиздат, 1997. 576 с.

15. Тур В.В., Кондратчик А.А. Расчёт железобетонных конструкций при действии перерезывающих сил. – Брест: БГТУ, 2000. 400 с.

References

1. Gvozdev A.A., Vasil'ev A.P., Dmitriev S.A. Izuchenie scepheniya novogo betona so starym. Moskva: Onti. Glav. red. stroit. lit-ry, 1936 (shkola FZU tresta «Poligrafkniga»). Pp. 29-47.

2. Koyankin A.A., Mitasov V.M., Tskhay T.A. Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 8(84). Pp. 162-172.

3. Evstifeev V.G. Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya soedinenij sbornyh obolochek [Experimental and theoretical studies of the connections of prefabricated shells]. Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk, Leningrad, 1967. 23 p.

4. Kremneva E.G., Hamenok E.V. Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. Stroitel'nye konstrukcii. 2011. №8. p. 48-53.

5. Deryagin B.V. CHto takoe trenie? [What is friction?] Moskva: Izdatel'stvo akademii nauk SSSR, 1963. 234 p.

6. Zimon A.D. CHto takoe adgeziya [What is adhesion]. M.: Nauka, 1983. 176p.
 7. Korovin N.N., Golosov V.N. Eksperimental'noe opredelenie koefficienta treniya na kontakte sbornogo i monolitnogo betona: Sovershenstvovanie stykov zhelezobetonnyh konstrukcij [Experimental determination of the coefficient of friction at the contact of precast and monolithic concrete: Improving the joints of reinforced concrete structures]. NIIZHB, 1987. Pp. 30-36.
 8. Petrov A.N. Beton i zhelezobeton, 1965, №11. p. 34-37.
 9. Ashkinadze G.N., Sokolov M.E., Martynova L.D., Lishak V.I., Tassios F., Cukantas S., Plajpis N., Skarnas A. ZHelezobetonnye steny sejsmostojkih zdaniy: Issledovaniya i osnovy proektirovaniya [Reinforced concrete walls of earthquake-resistant buildings: Research and design basics]. M.: Strojizdat, 1988. 499 p.
 10. Skvorcov A.G. Soprotivlenie kontaktnyh shvov zhelezobetonnyh konstrukcij pri dejstvii sdvigayushchih sil [Resistance of contact joints of reinforced concrete structures under the action of shear forces]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.01. M., 2000. 137 p.
 11. Sungatullin YA.G. Sbornye i sborno-monolitnye konstrukcii: sbornik nauchnyh trudov. Kazan'. Pp. 90-146.
 12. Kremneva E.G., Hamenok E.V. Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F, 2011. Pp. 48-52.
 13. Golyshev A.B., Bachinskij V.YA., Polishchuk V.P., Harchenko A.V., Rudenko I.V. Proektirovanie zhelezobetonnyh konstrukcij : Spravochnoe posobie [Design of reinforced concrete structures : A reference guide]. K.: Budivel'nyk, 1990. 544 p.
 14. Holmyanskij M.M. Beton i zhelezobeton: Deformativnost' i prochnost' [Concrete and reinforced concrete: Deformability and strength]. M.: Strojizdat, 1997. 576 p.
-



15. Tur V.V., Kondratchik A.A. Raschyot zhelezobetonnyh konstrukcij pri dejstvii pererezyvayushchih sil [Calculation of reinforced concrete structures under the action of cutting forces]. Brest: BGTU, 2000. 400 p.