

УДК 624.012.045

**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СОСТАВНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ ДЕФОРМАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

**ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТРИЩИНОСТІЙКОСТІ ТА ДЕФОРМАТИВНОСТІ ПОХИЛИХ ПЕРЕРІЗІВ У ЗАЛІЗОБЕТОННИХ СКЛАДЕНИХ КОНСТРУКЦІЯХ ПРИ ДЕФОРМАЦІЙНОМУ ВПЛИВІ**

**THE MAIN RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH CRACK RESISTANCE AND DEFORMABILITY INCLINED SECTION IN REINFORCED CONCRETE COMPOSITE CONSTRUCTIONS UNDER DEFORMATION IMPACT**

**Колчунов В. И., д.т.н, проф., Яковенко И. А., к.т.н, Усенко Н. В., инж., Приймак А.А., инж. (Национальный авиационный университет, г. Киев)**

**Колчунов В. І., д.т.н, проф., Яковенко І. А., к.т.н, Усенко Н. В., инж., Приймак О.А., инж. (Національний авіаційний університет, м. Київ)**

**Kolchunov V. I., doctor of technical sciences, professor, Yakovenko I.A., candidate of technical sciences, Usenko N.V., engineer, Priijmak A.A., engineer (National Aviation University, c. Kiev)**

**Приведены основные результаты экспериментальных исследований трещиностойкости и деформативности наклонных сечений в железобетонных составных конструкциях при деформационном воздействии**

**Наведені основні результати експериментальних досліджень тріщиностійкості та деформативності похилих перерізів у залізобетонних складених конструкціях при деформаційному впливі**

**The main results of experimental studies of crack resistance and deformability inclined sections in reinforced concrete composite constructions under deformation impact**

**Ключевые слова:**

**Железобетон, арматура, деформации, эксперимент, трещины, конструкции. Залізобетон, арматура, деформації, експеримент, тріщини, конструкції.**

Reinforced concrete, armature, deformations, experiment, cracks, constructions.

**Экспериментальные исследования проводились с целью** проверки предлагаемого расчетного аппарата и выявления закономерностей трещинообразования и деформативности шва железобетонных составных конструкций при совместном деформационном воздействии в пролете «среза» и определения основных параметров, с учетом взаимных смещений арматуры и бетона, эффекта нарушения сплошности и его анализа на различных стадиях нагружения, а также для разработки рекомендаций по эффективному проектированию железобетонных составных конструкций.

**Программа исследований включала** испытания пяти серий железобетонных составных конструкций [1]. Количество испытываемых конструкций принято с учетом варьирования диаметра и шага хомутов, продольного армирования, класса основного и дополнительного бетонов и пролета «среза», рис. 1.

Основные результаты экспериментальных исследований трещиностойкости и деформативности наклонных сечений в железобетонных составных конструкциях при деформационном воздействии

При разработке методики экспериментальных исследований предусматриваются пять групп тензорезисторов: первая – по высоте поперечного расчетных сечений (с обязательной установкой на берегах шва); вторая – мембранные розетки на берегах шва; третья – розетки над опасной кривой трещиной; четвертая – розетки на составных призмах; пятая – на бетоне вдоль оси продольной арматуры в том числе и на берегах трещины см рис. 2.

Основными параметрами, за которыми велись наблюдения в эксперименте являлись картины образования, раскрытия и развития трещин при соответствующих нагрузках, характер разрушения и величина разрушающей нагрузки, а также значения прогибов на соответствующих ступенях нагружения. Весьма информативными в этом отношении можно рассматривать картины трещин (рис. 3), зарисованных во время эксперимента на специальных планшетах, показания тензорезисторов и мембранных розеток, а также графики средних деформации сжатого бетона и растянутой арматуры (рис. 4, 5).

Для опытной конструкции третьей серии БС–III–2,7–100Ø10(Ø10А400С) (растянутая арматура 2Ø16А400С) трещины образовались в зоне нейтральной оси и развивались как в направлении к верхней грани, так и в направлении к продольной растянутой арматуре.

При этом максимальное раскрытие наклонных трещин на уровне продольной оси поперечной арматуры составляло на X ступени нагружения (0,79 от разрушающей) составляло 0,2 мм, а на удалении 2 диаметров арматуры – 0,3 мм соответственно.

Для опытной конструкции первой серии БС–I–1,5–150 (растянутая арматура 2Ø16А400С) трещины образовались в зоне нейтральной оси и развивались как в

направлении к верхней грани, так и в направлении к продольной растянутой арматуре. При этом максимальное раскрытие наклонных трещин на уровне оси рабочей продольной арматуры составляло на XI ступени нагружения (0,7 от разрушающей) составляло 0,23 мм, а на удалении 2 диаметров арматуры – 0,36 мм соответственно.

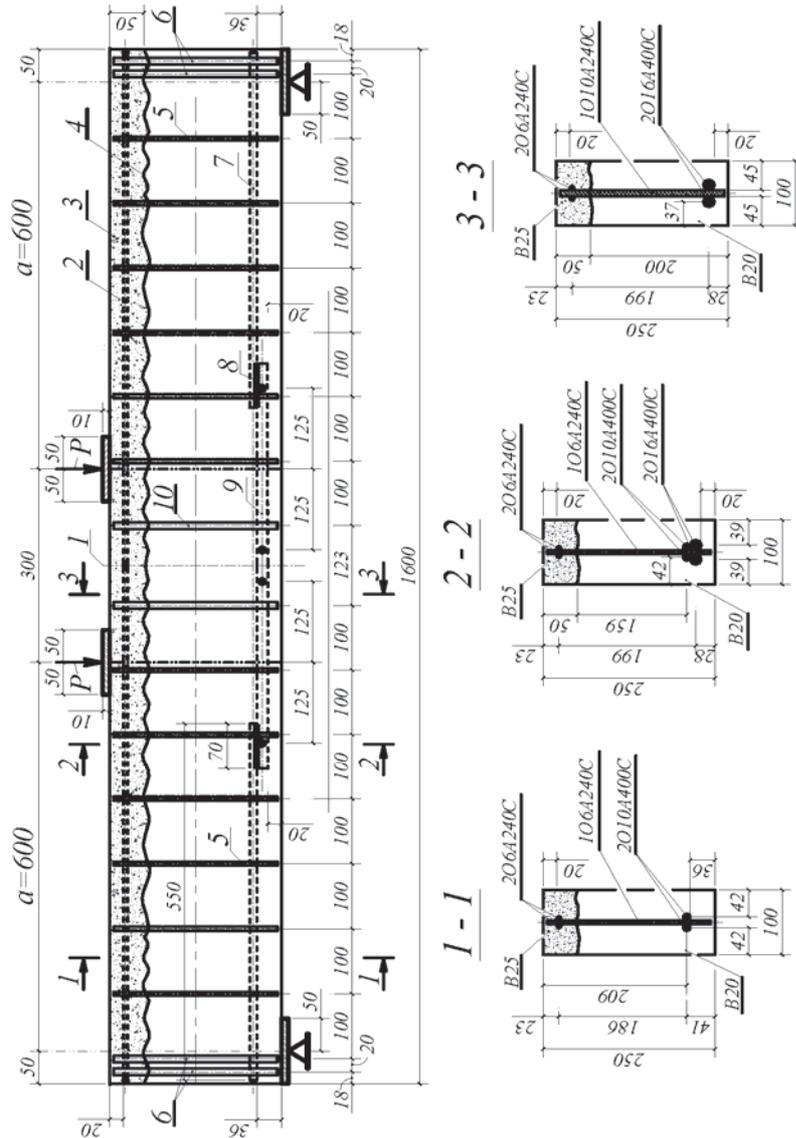


Рис. 1. Опытная железобетонная конструкция второй серии составного сечения БС-П-2,7-100

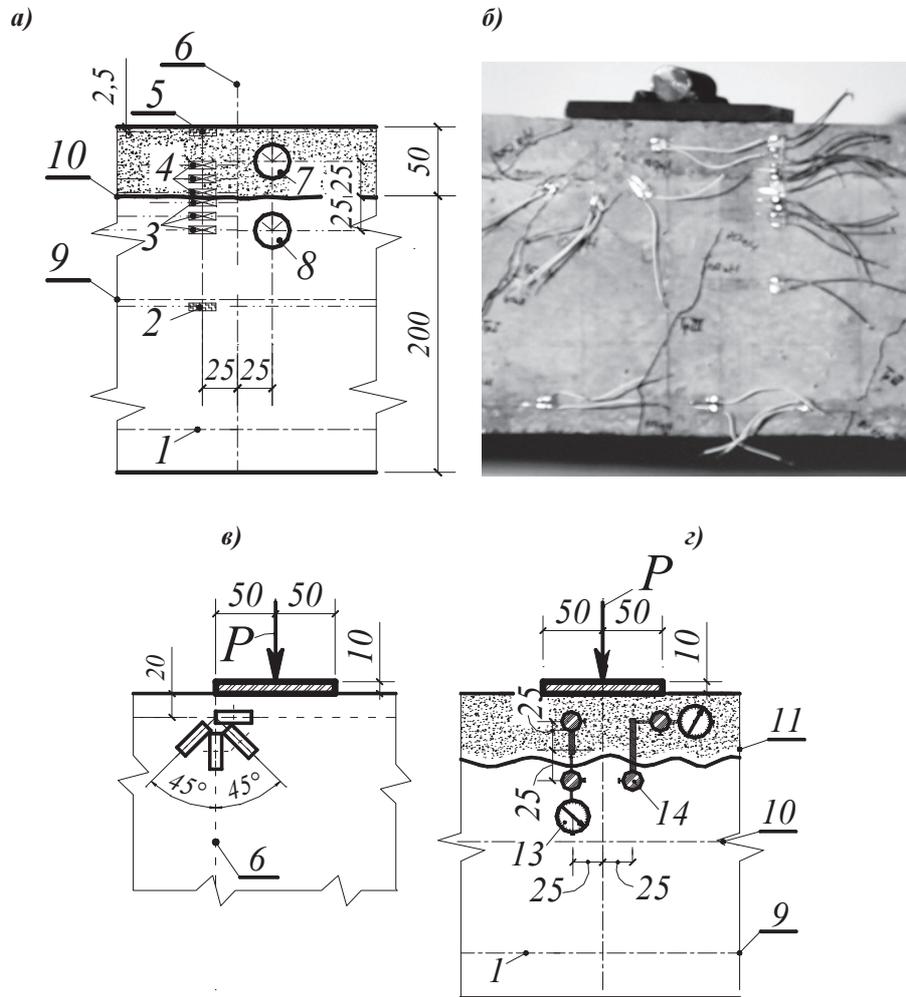


Рис. 2. Схема расположения первой, второй групп электротензорезисторов и механических приборов в исследуемых зонах железобетонных составных конструкций: *a* – схема расположения первых двух групп электротензорезисторов и механических приборов; *b* – общий вид установленных электротензорезисторов первой и третьей группы; *c* – схема размещения розеток в зоне сечения I–I над опасной наклонной трещиной; *d* – схема расположения механических приборов для определения линейных деформаций и деформаций сдвига в окрестности шва

На рис. 2 обозначено: *1*– гайки, приваренные к рабочей арматуре, расположенные перпендикулярно к оси растянутой арматуры *9*; *2* – электротензорезисторы, расположенные снизу от нейтральной оси *11*; *3* – то



опытных образцов, расположенных в сечении 1–1, которые построены на основе показаний электротензорезисторов и механических приборов с ценой деления 0,002мм. Кроме опытных данных о деформациях сжатого бетона и растянутой арматуры на соответствующих ступенях нагружения, эти графики дают возможность получить фактическую высоту сжатой зоны и оценить возможность использования гипотезы плоских сечений для средних деформаций бетона и арматуры (база механических приборов ( $l = 250$  мм) соизмерима с расстоянием между трещинами при эксплуатационном уровне нагружения).

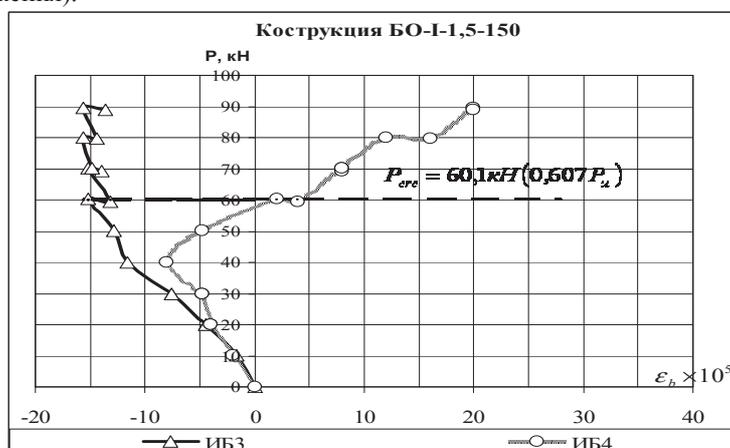


Рис. 4. Графики зависимости деформаций сжатого бетона по механическим приборам от нагрузки в  $\kappa H \times 10^{-1}$  в опытной конструкции первой серии БО-1-1,5-150

Выявлено, что в железобетонных составных конструкциях в месте шва между бетонами происходят возмущения деформаций (рис. 6), которые представляется возможным заменить условным сосредоточенным сдвигом при экстраполяции гипотезы плоских деформаций каждого слоя в местных зонах, прилегающих к шву.

Следует отметить, что проведенный анализ таких графиков позволяет с уверенностью утверждать о целесообразности использования гипотезы плоских сечений (рис.6) в пределах каждого из составляющих стержней для средних деформаций бетона и арматуры в железобетонных составных конструкциях на всем диапазоне нагружения.

При проведении экспериментальных исследований выяснено, что арматура сдерживает раскрытие трещины, противодействуя раскрытию ее берегов. Возникающие при этом реакции вызывают местное сжатие в бетоне в окрестности трещины в околоарматурной зоне – эффект нарушения сплошности (деформационный эффект). Одновременное действие  $M$ ,  $Q$  и наличие мощной растянутой арматуры приводят к тому, что трещины имеют

максимальное раскрытие не на уровне оси арматуры, а в некоторой зоне – 2 – 3 диаметра арматуры (между нейтральной осью и осью растянутой арматуры) выше оси растянутой арматуры или в зоне нейтральной оси между

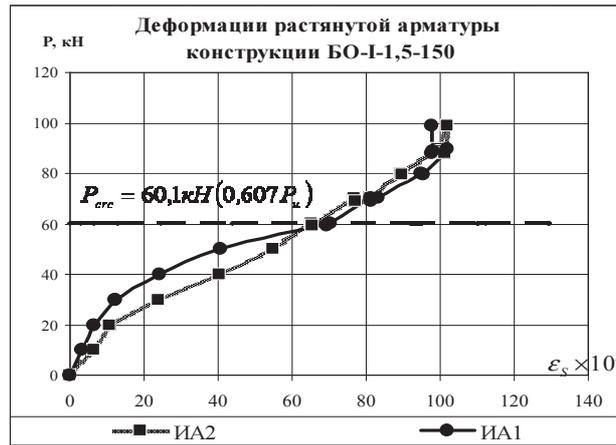


Рис. 5. Графики зависимости деформаций рабочей арматуры по механическим приборам от нагрузки в  $\text{кН} \times 10^{-1}$  в опытной конструкции первой серии БО – I – 1,5 – 150

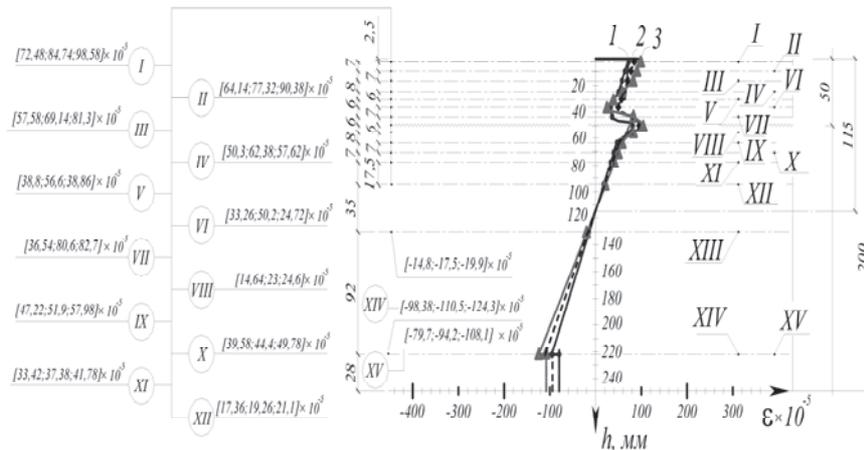


Рис. 6. Графики деформаций сжатого бетона и растянутой арматуры в поперечном сечении опытной железобетонной конструкции БСП-2,7-100-320 расположенного в зоне, прилегающей к сечению 1-1: I-XIV – оси баз электротензорезисторов, расположенных на бетоне, XV – то же, на арматуре; 1 – на ступени нагружения  $0,6P_u$ ; 2 – то же  $0,7P_u$ ; 3 – то же  $0,8P_u$

хомутами. Движение трещины идет по двум направлениям: в сторону сжатой грани бетона и в сторону продольной растянутой арматуры. При этом на

пересечении с хомутами ширина раскрытия трещин меньше, чем на некотором (порядка двух диаметров) удалении от хомутов. Аналогичные опытные данные были получены для всех серий опытных образцов.

Следует отметить, что для всех серий на графиках экспериментальных зависимостей  $a_{crc} - \Delta_i / \Delta_u$  ширина раскрытия трещин возрастает с увеличением уровня нагружения несмотря на то, что с увеличением напряжений в арматуре происходит одновременное уменьшение расстояния между трещинами (см. рис. 7). При учете многоуровневого процесса образования трещин можно было ожидать уменьшение ширины раскрытия трещин, так как, несмотря на увеличение уровня нагружения и роста напряжений в арматуре, происходит уменьшение расстояния между трещинами (изменение расстояния между трещинами происходит дискретно (обратно пропорционально изменению изгибающих моментов)), которое носит противоположный характер влияния на ширину раскрытия трещин. Однако этого не произошло.

Полученный экспериментальный результат ставит весьма конкретное требование к предлагаемой расчетной методике: расчет хотя бы качественно должен подтвердить эту закономерность, замеченную в опыте.

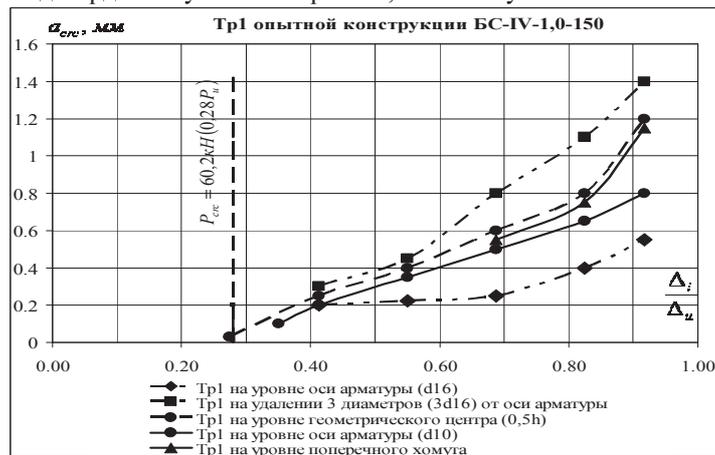


Рис. 7. Графики зависимостей ширины раскрытия первой образовавшейся трещины Тр1 (сторона А) от  $\Delta_i / \Delta_u$  экспериментальной конструкции четвертой серии БС-IV-1,0-150 пролетом «среза» 1,0

Перед образованием первой нормальной трещины на графике зависимости прогиба в опытной конструкции первой серии БС – I – 1,5 – 150 от нагрузки в  $kH \times 10^{-1}$  (рис. 8) имеет место перелом, характеризующий переход при смене условий равновесия. Что же касается образования первой наклонной трещины, то такого перелома на этом графике не наблюдается и только использование специальных планшетов при освидетельствовании

опытной конструкции позволило выявить степень нагружения и координаты ее расположения см. рис. 3 и 7.

Видимые нормальные трещины в зоне чистого изгиба были обнаружены с помощью микроскопа через ступень после образования этого перелома. На следующей ступени нагружения эти трещины получили развитие практически до нейтральной оси. Таким образом перелом на графике (рис. 8) «нагрузка–прогиб» наиболее точно характеризует момент образования нормальных трещин в железобетонной составной конструкции.

Перед разрушением на графике зависимости прогиба в опытной конструкции первой серии БС – I – 1,5 – 150 от нагрузки в  $\text{кН} \times 10^{-1}$  (рис. 8) имеет место скачок, характеризующий переход при смене условий равновесия.

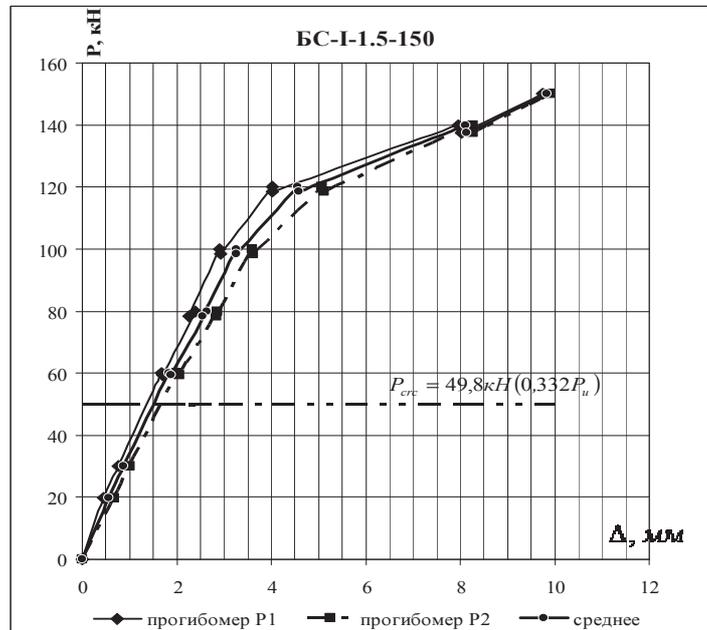


Рис. 8. Графики экспериментальных зависимостей «нагрузка – перемещение» для железобетонной составной конструкции БС-I-1.5-150 первой серии

Весьма важным является также полученный результат о том, что в пределах эксплуатационной нагрузки (0,6 – 0,8 от разрушающей), высота сжатой зоны бетона практически не изменяется. При этом плоские сечения пересекаются в одной точке (как бы поворачиваясь вокруг нее). Результаты обработки электротензометрических цепочек и розеток, установленных на основные образцы и составные призмы позволили получить следующие опытные значения коэффициента жесткости шва  $\xi$ : для швов между

бетонами В20/В30,  $\xi = 1982,2 \text{ кН} / \text{см}^2$ ; для швов между бетонами В30/В30,  $\xi = 2528,5 \text{ кН} / \text{см}^2$ .

Итак, на основе проведенных экспериментов и результатов их обработки опытных конструкций всех серий подтверждена многоуровневая схема трещинообразования (согласно которой трещины образуются на всем диапазоне нагружения, вплоть до разрушения, – получены картины, аналогичные рис. 3) и построены графики экспериментальной зависимости  $a_{crc} - \Delta_i / \Delta_u$  (рис. 7) составных железобетонных конструкций, в зависимости от уровня нагружения.

**Получены экспериментальные данные** следующих основных параметров: ширины раскрытия трещин на уровне оси продольной и поперечной растянутой арматуры и в нескольких уровнях над растянутой арматурой ( $a_{crc}$  вдоль всего профиля трещины); изменения расстояния между трещинами  $l_{crc}$  (функционального и уровняго) и длины трещин  $h_{crc}$  по мере увеличения нагрузки (с выявлением многоуровневого процесса образования трещин), средних деформаций продольной и поперечной арматуры в трещине и между трещинами с учетом эффекта нарушения сплошности, несовместных деформаций бетона и арматуры, условного сосредоточенного сдвига в швах, фибровых деформаций сжатого бетона, высоты сжатой зоны бетона, при варьировании разных пролетов «среза», диаметра и шага хомутов.

Таким образом полученные экспериментальные данные в значительной мере дополняют накопленный экспериментальный материал и предоставляют возможность проверки предлагаемого расчетного аппарата по уточненному определению появления и развития наклонных трещин с учетом эффекта нарушения сплошности, несовместных деформаций бетона и арматуры, условного сосредоточенного сдвига в швах и ее анализа на различных стадиях нагружения с проверкой предлагаемых расчетных зависимостей по эффективному проектированию железобетонных составных конструкций.

1. Колчунов В. И. Методика экспериментальных исследований железобетонных составных конструкций по наклонным сечениям / В. И. Колчунов, И. А. Яковенко, Н. В. Усенко, А. А. Приймак // Будівельні конструкції : міжвідом. наук.-техн. зб. наук. праць (будівництво) / ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку та житлово-комунального господарства України. – К., ДП НДІБК, 2013. – Вип. 78: В 2-х кн. : Книга 1. – С. 422–433.