



ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗА ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТЫКОВ ПАНЕЛЬНЫХ ЗДАНИЙ

В статье представлен подход к оценке вероятности отказа вертикального стыка панельного здания на закладных деталях по критерию прочности сварного шва (по металлу/границе сплавления) и прочности тела закладной детали на срезающие усилия. На основе предложенного подхода можно оценить критерий, который влияет в большей мере на надежность узлового соединения, повысить требования к данному критерию, изменить конструкцию стыка или обеспечить контроль данного параметра на строительной площадке. В качестве оценки вероятности отказа будет использоваться статистический метод.

Надежность, вероятностное проектирование, вертикальный стык, несущая способность стыка, панельное здание, закладные детали, монтажная деталь.

Надежность строительных конструкций является показателем безопасности и ответственности здания, особенно важным данный параметр является при проектировании зданий с податливой схемой каркаса. Если в течение расчетного срока эксплуатации здания обеспечено выполнение требований предельных состояний конструкций, то надежность строительного объекта считается обеспеченной.

Как отмечается в работах [1–3], актуальным и современным методом для обоснования расчетных характеристик и уровня надежности строительных объектов являются вероятностные методы.

Согласно выступлению замглавы Министра РФ, Александр Ломакин от 27.10.2023:

«У нас достаточно большое количество аварийного жилья. А денег на ускоренную реализацию программы расселения, к сожалению, недостаточно. Но ускорить расселение аварийных домов призван механизм комплексного развития территорий» [4].

При данной ситуации строительство крупнопанельных зданий с применением современных материалов может обеспечить потребность населения в новом, комфортном жилье экономкласса. У крупнопанельного строительства имеется ряд плюсов, которые переведены и обоснованы в статье [5].

Один из плюсов – скорость монтажа, но это может обернуться минусом в плане надежности здания в целом, т.к. ответственный монтаж, в котором имеются переменные, выполняемый людьми, может отклоняться от проектного в рамках установленных норм.

Вертикальные стыки обеспечивают пространственную неизменяемость здания и воспринимают

основные усилия сдвига. Оценить рамки отклонения и влияние этих отклонений (у вертикальных стыков) на несущую способность здания – первостепенная задача для повышения надежности возводимых зданий и крупных панелей [6].

Несущая способность стыков крупнопанельных зданий на закладных деталях рассчитывается по 3 критериям предельных состояний: это несущая способность шва по границе сплавления, несущая способность шва по металлу шва и несущая способность рабочей зоны монтажной детали на срез. Также учитывается положение монтажной детали в плоскости стыка, это дает еще 3 направления (X , Y , Z) для анализа несущей способности в данных плоскостях [7].

В данной работе рассмотрен стык крупнопанельного здания на закладных деталях с применением угловой монтажной детали (уголка). Монтажный стык стеновых панелей представлен на рисунке 1.

Согласно [7] прочность стыка обеспечена, если выполняется условие:

$$N_i < \min(\tilde{R}_X, \tilde{R}_Y, \tilde{R}_Z), \quad (1)$$

где N_i – усилие в элементе связи на i -м направлении (X ; Y ; Z), определяемое по результатам комплексного расчета в программном комплексе;

$\tilde{R}_X, \tilde{R}_Y, \tilde{R}_Z$ – несущая способность стыка по соответствующим направлениям (минимальные условия прочности сварного шва или поперечного сечения монтажной детали).

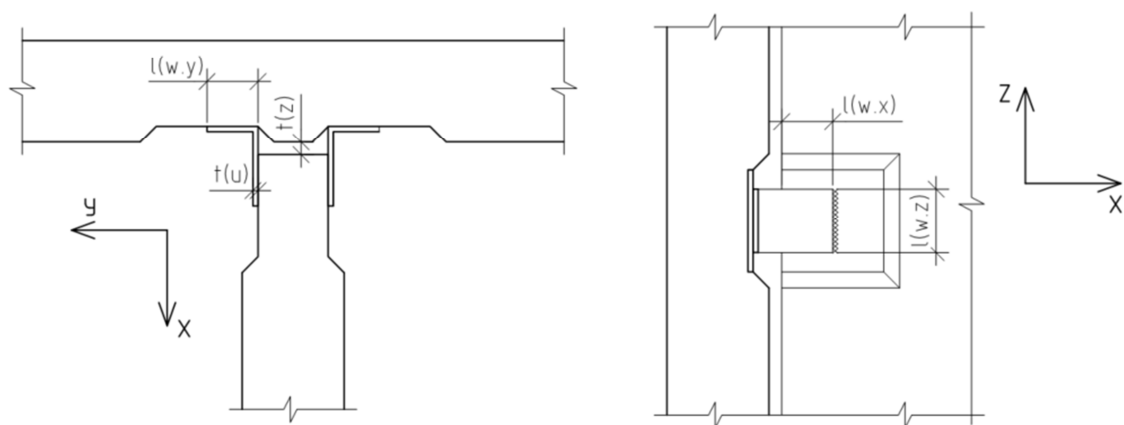


Рис. 1. Монтажный стык стеновых панелей на закладной детали уголок

Таблица

Статистические параметры величин в математической модели

Параметр	Распределение	Параметры	Примечание
Длина сварного шва l_w	Равномерное	[84; 90] мм	Допуск ± 3 мм ГОСТ Р ИСО 13920-2017
Катет сварного шва k_w	Равномерное	[3,5; 5] мм	Допуск -0,5; +1 мм по ГОСТ 14771-76
Толщина зазора t_z	Равномерное	[5; 35] мм	Допуск ± 15 мм по проекту
Толщина уголка t_u	Равномерное	[7; 9] мм	Допуск ± 1 мм по ГОСТ Р 8509-93
Усилие N	Постоянная величина	1,6 тонн	По проекту
Предельное напряжение стали по пределу текучести R_y	Нормальное	$\bar{R}_y = 261,5$ МПа; $\bar{S} = 13,08$ МПа	Сталь С245
Нормативное временное сопротивление металла шва растяжению R_{wun}	Нормальное	$\bar{R}_{wun} = 490,3$ МПа; $\bar{S} = 24,16$ МПа	Э50, Э50А; Св-08Г2С

По рисунку 1 видно, что расчетные длины швов в $l(w,x)$ и $l(w,y)$ значительно больше, т.к. их длины учитываются по верхней и нижней граням уголка, соответственно для несущей способности швов плоскость Z будет менее выгодна, чем X и Y . Поперечное сечение, работающее на срез в плоскости X и Y , определяется как произведение длины монтажной детали и ее толщины, а для плоскости Z это значение является произведением толщины зазора и толщины уголка, зазор по проекту 20 мм, значит для среза также невыгодно положение в плоскости Z .

Примем за основу расчета уголок 125×80×8 длиной 100 мм и сварные швы с катетами 4 мм. В качестве расчетной плоскости выбираем плоскость Z .

Так как все стыки панельного здания заменяться податливыми элементами конечной жесткости и взаимно влияют друг на друга, сложно оценить усилие, которое возникает в абстрактном стыке, поэтому для упрощения задачи принимаем усилие N_z постоянной величиной среднего значения усилий совокупности одной из расчетных моделей объекта.

Случайные параметрами отражены в таблице.

По результатам генерации 100 000 значений по указанным в таблице параметрам, можно сделать вывод, что факторы по несущей способности шва для

выбранных исходных данных всегда удовлетворяют критерию прочности. Поэтому дальше критерий прочности по несущей способности сварного шва не рассматривается, и его влияние считается незначительным.

Критерий прочности поперечного сечения, работающего на срез, не обеспечивает стабильно удовлетворяющего условия, поэтому анализ данных построен на данном критерии.

Несущая способность монтажной детали на срез определяется по формуле:

$$\bar{R}_Z = (\bar{t}_z \times \bar{t}_u \times 0,58 \times \bar{R}_y) / g, \text{ т}, \quad (2)$$

где $\bar{t}_z$ – случайная величина толщины зазора между стеновыми панелями;

$\bar{t}_u$ – случайная величина толщины уголка;

$\bar{R}_y$ – случайная величина предельного напряжения стали по пределу текучести;

g – гравитационная постоянная.

По результатам расчета 100 000 значений представлена функция распределения случайной величины на рисунке 2.

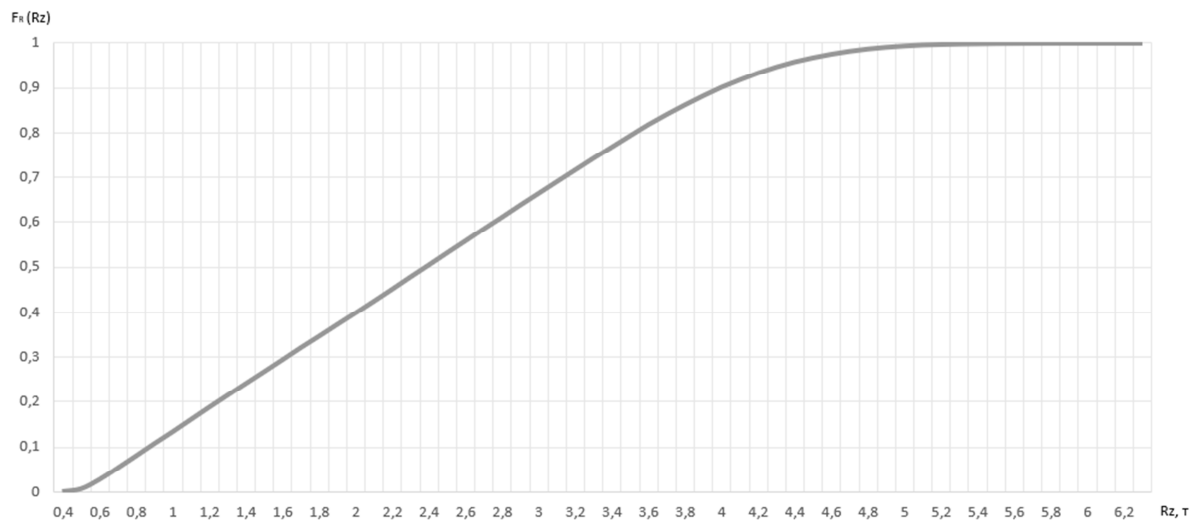


Рис. 2. Функция распределения вероятностей для несущей способности по критерию прочности поперечного сечения монтажной детали $\bar{R}_z$ как случайной величины по результатам генерации данных

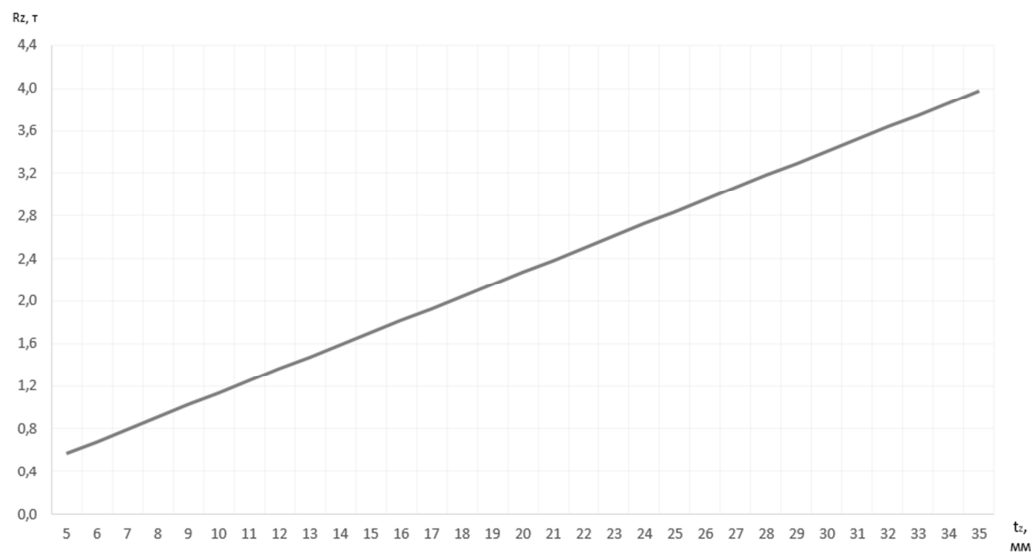


Рис. 3. Функция несущей способности R_z по критерию случайной величины $t(z)$ на основе результатов генерации данных

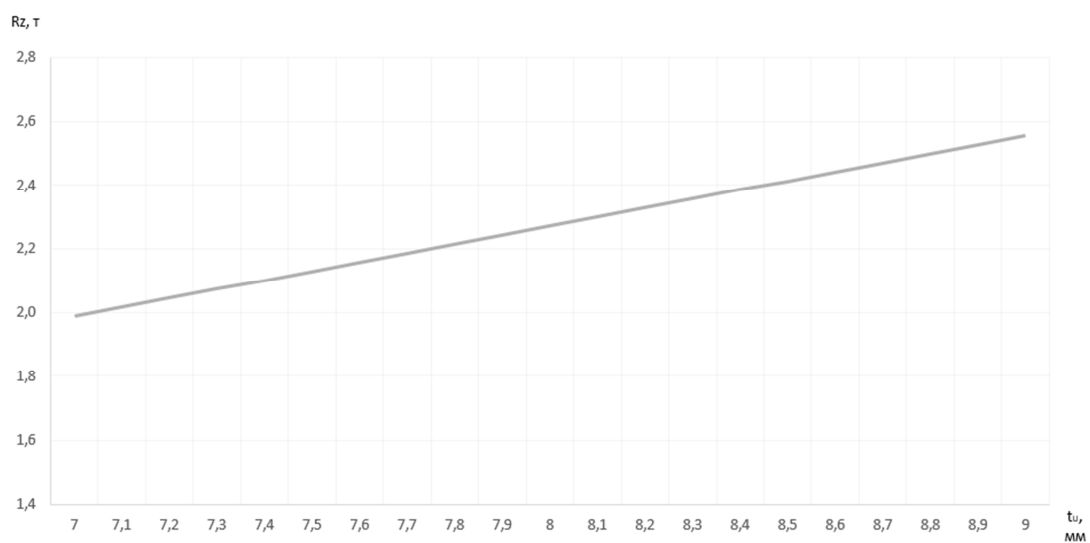


Рис. 4. Функция несущей способности R_z по критерию случайной величины $t(i)$ на основе результатов генерации данных

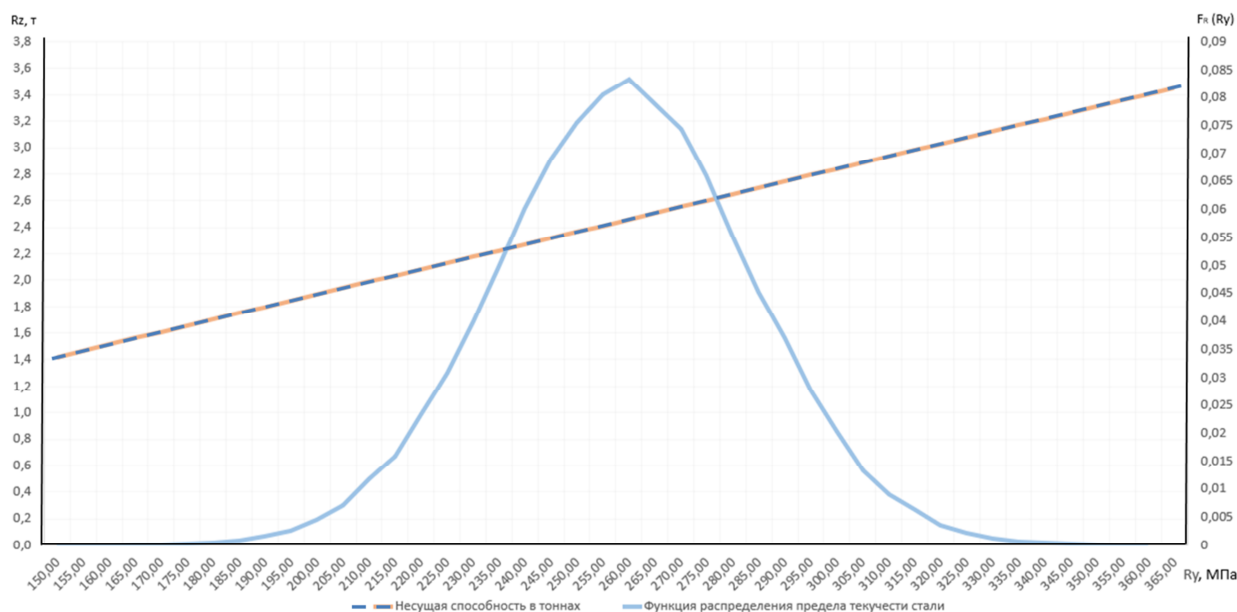


Рис. 5. Функция несущей способности R_z по критерию случайной величины $R(y)$ на основе результатов генерации данных и распределение вероятностей для временного сопротивления стали по пределу текучести

Вероятность безотказной работы:

$$P(t) = [N_0 - n(t)]/N_0, \quad (3)$$

где N_0 – число генераций;

$n(t)$ – число отказов (неблагоприятных исходов).

Для представленного распределения вероятность по критерию прочности поперечного сечения на срез, вероятность безотказной работы составляет 0,72.

Вероятность отказа 0,28.

Для повышения надежности конструкций необходимо определить степени влияния каждого фактора на несущую способность монтажной детали по срезающим усилиям.

Для этого выполним контрольные расчеты, в которых обеспечим неизменными значениями все параметры, кроме исследуемого. Это позволит оценить степень влияния каждого из параметров.

Ниже представлены графики зависимостей несущей способности от: толщины зазора (рис. 3); толщины уголка (рис. 4); расчетного сопротивления стали по пределу текучести (рис. 5).

По результатам расчета и представленным графикам зависимостей, можно сделать выводы, что критическим фактором является толщина зазора между стеновыми панелями.

При генерации случайной величины критерия толщины уголка, по значениям из таблицы, несущая способность стыка в отрицательные показатели не уходят, следовательно данный параметр и его вариативность можно считать надежным.

Генерация в качестве случайной величины критерия расчетной несущей способности стали по пределу текучести, по значениям из таблицы, установила, что в 6 случаях из 100 000 условие (1) приняло отрицательное значение. Таким образом, вероятность отказа стыка можно оценить как:

$$P(R_y) = 6/100\,000 = 0,00006 \text{ или } 0,006 \, \%.$$

Также можно считать, что данный критерий оказывает незначительные влияние на надежность конструкцию стыка.

При генерации случайной величины критерия толщины зазора, по значениям из таблицы, установила, что в 28 048 случаях из 100 000 условие (1) приняло отрицательное значение. Таким образом, вероятность отказа стыка можно оценить как:

$$P(t_z) = 28048/100\,000,$$

$$P(t_z) = 0,2805 \text{ или } 28,05\%.$$

Данный параметр является критическим фактором для обеспечения надежности стыка крупнопанельных зданий на закладных деталях. Попробуем проанализировать, при каком допуске на толщину зазора надежность стыка будет обеспечена с вероятностью 0,95.

До подбора толщина зазора изменялась в диапазоне $\tilde{t}_z \in [5; 35]$ мм, или ± 15 мм от проектного значения 20 мм.

В результате подбора определено, что понижение верхней границы существенной роли не играет, повышение нижней границы до 14 мм обеспечивает требуемую надежность.

Таким образом, новые допуски

$$\tilde{t}_z \in [14; 35] \text{ мм.}$$

Генерация случайных величин в данном диапазоне установила, что в 4456 случаях из 100 000 условие (1) приняло отрицательное значение. Таким образом, вероятность отказа стыка можно оценить как:

$$P(t_z) = 4456/100\,000 = 0,04456 = 4,46 \, \%.$$

При установке более строгих допусков с -5 мм до -9 мм получается результат, выраженный в снижении вероятности отказа стыков панельных зданий на закладных деталях на 24,5 %.

Вероятностные подходы могут быть успешно использованы для обоснования уровня надежности различных типов конструкций [8–10].

Таким образом, на основе предложенной методики к анализу вероятности отказа вертикальных стыков панельных зданий по критерию прочности поперечного сечения монтажной детали на срез можно повысить критерий безопасности и расставить приоритеты для контроля тех или иных зон на строительной площадке в целях обеспечения надежности здания.

Литература

1. Соловьев, С. А. Метод вероятностного анализа надежности элементов конструкций на основе граничных функций распределения / С. А. Соловьев, А. А. Соловьева // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 10. – С. 1545–1555.
2. Шевцов, Л. С. Вероятностный подход в проектировании изгибаемых элементов из армированного арболита / Л. С. Шевцов, А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2023. – № 2(20). – С. 15–17.
3. Соловьева, А. А. Вероятностные модели случайных величин в строительном проектировании / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2024. – 144 с.
4. Первый замглавы Минстроя Ломакин рассказал о новых льготах для застройщиков и преимуществах панельных домов : российская газета. – URL: <https://rg.ru/2023/10/27/pervyj-zamglavy-minstroia-lomakin-rasskazal-ono-vyh-lgotah-dlia-zastrojshchikov-i-preimushchestvah-panelnyh-domov.html> (дата обращения: 29.05.2025). – Текст : электронный.
5. Блажко, Д. А. Трудности и возможности современного панельного домостроения / Д. Н. Блажко, А. Л. Гусева // AlfaBuild. – 2017. – Вып. 1., т. 1. – С. 111–120.
6. Онтология исследования эффективности и перспектив крупнопанельного и монолитного железобетонного строительства жилых объектов / Р. Г. Абакумов, И. П. Авилова, М. М. Абакумова, С. А. Анисимов // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. – 2019. – № 10 – С. 40–52.
7. Пособие по расчету крупнопанельных зданий. Выпуск 1. Характеристики жесткости стен, элементов и соединений крупнопанельных зданий – Москва : МНИИП ИТИЭП ГлавАПУ Мосгорисполкома, 1974. – 42 с.
8. Соловьева, А. А. Исследование прочностных показателей арболита при повышенной влажности / А. А. Соловьева, Л. С. Шевцов, С. А. Соловьев // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2023. – № 1(19). – С. 33–35.
9. Solovev, S. A. Probabilistic Design of Flexural Cross-Laminated Timber Structural Elements / S. A. Solovev, V. M. Puchkov, A. A. Soloveva // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2024. – Vol. 20, № 2. – P. 99–108.
10. Соловьев, С. А. Надежность строительных конструкций: история, анализ, прогноз / С. А. Соловьев, А. А. Соловьева. – Москва : АСБ, 2025. – 468 с.

A.R. Dyomin
Vologda State University

ASSESSMENT OF PANEL BUILDINGS VERTICAL JOINTS FAILURE PROBABILITY

The article presents an approach to assessing the probability of failure of the vertical joint of a panel building on embedded parts according to the criterion of weld strength (metal/fusion boundary) and the strength of the body of the embedded part for shearing forces. Based on the proposed approach, it is possible to evaluate a criterion that has a greater impact on the reliability of the nodal connection, to increase the requirements for this criterion, to change the joint design or ensure control of this parameter on the construction site. A statistical method will be used as an estimate of the probability of failure.

Reliability, probabilistic design, vertical joint, bearing capacity of joint, panel building, embedded parts, assembly part.