

Экспериментальное обоснование монтажных допусков для несъемной опалубки из сталефибробетона

Д.Е. Капустин^{1,2}, П.В. Травкин¹

¹Акционерное Общество «Институт «Оргэнергострой», Москва

²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: Одним из способов сокращения сроков возведения атомных электростанций является применение сборно-монолитной технологии строительства с использованием армоопалубочных блоков заводского изготовления, состоящих из арматурного каркаса и листов несъемной опалубки из высокопрочного сталефибробетона. Сборные элементы после монтажа в проектное положение заполняют самоуплотняющейся бетонной смесью, значительно снижая трудозатраты на строительной площадке. При этом самоуплотняющиеся бетонные смеси отличаются высокой подвижностью и значительным содержанием цементного теста, что повышает требования к обеспечению герметичности опалубочной системы. В представленной статье описаны результаты экспериментальных исследований по оценке параметров заполнения технологических зазоров между листами несъемной опалубки самоуплотняющейся бетонной смесью при различных высотах ее укладки. Представлено описание установки, позволяющей в лабораторных условиях моделировать давление свежееуложенной бетонной смеси, высотой до 5 метров. Установлено, что зазоры между листами сталефибробетонной опалубки не должны превышать 8 мм. Представленные рекомендации по устройству стыков сталефибробетонной опалубки включены в отраслевые документы по стандартизации.

Ключевые слова: АЭС, несъемная опалубка, испытание конструкций, сталефибробетон, самоуплотняющаяся бетонная смесь, давление на опалубку

Применение инновационных материалов и технологий повышает конкурентоспособность строительной отрасли России на мировом рынке. Так, например, используемая при возведении атомных электростанций (АЭС) технология сборно-монолитного строительства позволила значительно сократить сроки ввода в эксплуатацию новых энергоблоков [1, 2]. При этом используемые при строительстве высокопрочные бетоны и сталефибробетоны повышают надежность и долговечность строительных конструкций, в том числе с учетом особенностей нагрузок и воздействий [3-5].

Сборно-монолитная технология предусматривает использование сборных армоопалубочных блоков (АОБ) заводского изготовления,

состоящих из арматурного каркаса и листов несъемной сталефибробетонной опалубки (СФБО). Готовые к монтажу АОБ доставляют на строительную площадку, устанавливают в проектное положение и заполняют самоуплотняющейся бетонной смесью. В результате значительно сокращают объем работ на строительной площадке (опалубочные работы, арматурные работы, затирка лицевой поверхности после распалубки), а использование самоуплотняющихся бетонных смесей практически полностью исключает образование каверн и дефектов [1].

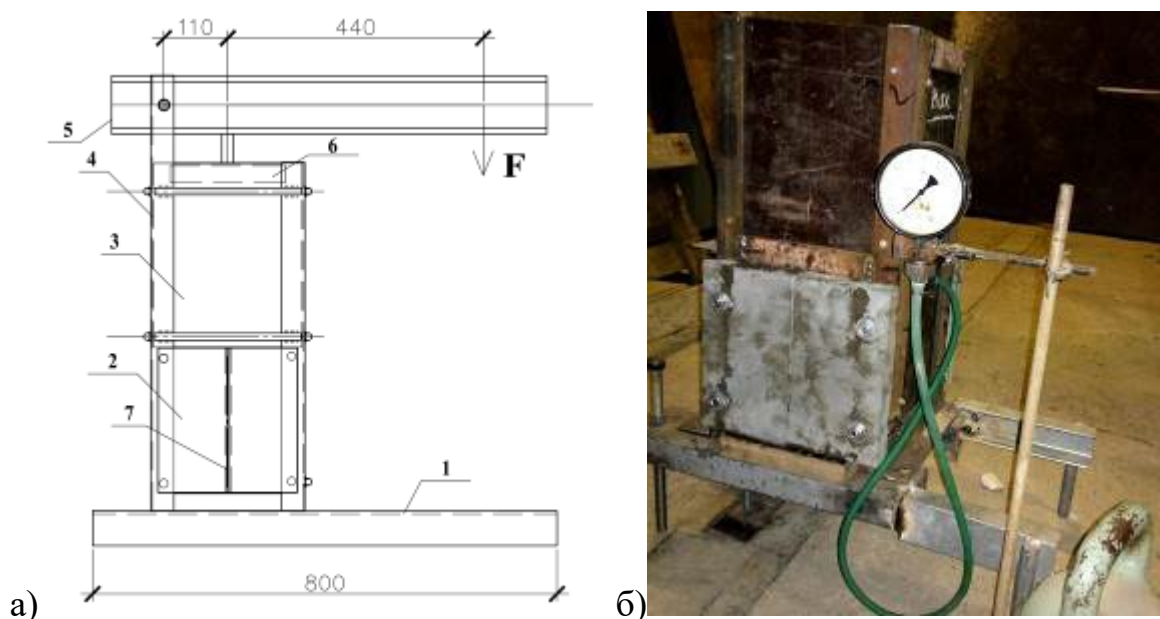
СФБО имеет толщину 30 мм и изготавливается с использованием высокопрочной мелкозернистой бетонной матрицы, что позволяет получать качественную лицевую поверхность, не требующую дополнительной обработки. В тоже время прочностные и деформационные характеристики СФБО (прочность на сжатие более 100 МПа, прочность на осевое растяжение более 10 МПа, модуль упругости более 40 ГПа, коэффициент ползучести не более 1,0) позволяют ее использовать как несущий конструктивный элемент, что отражено в ГОСТ Р 59964-2021 (Комбинированные железобетонные конструкции атомных станций с несъемной сталефибробетонной опалубкой) [5-7].

Эффективность использования несъемной опалубки, в том числе из сталефибробетона, была отмечена и в гражданском строительстве [8-10]. Наличие в железобетонном сечении слоя из сталефибробетона в виде опалубочного листа повышает прочность, трещиностойкость и жесткость изделия [8, 11, 12]. Совместная работа сталефибробетона и монолитного бетона обеспечивается за счет адгезии [1, 4], а также за счет устройства дополнительных анкерных элементов [6, 8].

Однако, при разработке тех или иных конструктивных решений особое внимание следует также уделять и технологическим аспектам [2, 13]. Так применение самоуплотняющейся бетонной смеси, отличающейся большей

подвижностью, текучестью и содержанием в составе цементного теста, требует обеспечение герметичности опалубки, для исключения ее вытекания. В тоже время при сборке АОБ между листами СФБО образуются зазоры, размер которых может варьироваться в широком диапазоне в зависимости от точности изготовления. Согласно отраслевым документам по стандартизации допуски по размерам листов СФБО составляют по длине и ширине от плюс 0 до минус 3 мм. Исходя из особенностей работы конструкций АЭС, выполняющих также функции биологической защиты, в железобетонных конструкциях не должно быть полостей, к которым могут быть отнесены незаполненные бетоном зазоры между листами СФБО. Также через зазоры между СФБО при бетонировании не должна вытекать бетонная смесь, образуя наплывы на поверхности, либо зацебенность монолитного бетона за опалубкой в зонах выхода цементного теста.

Для экспериментального определения заполняемости зазоров между СФБО в зависимости от их толщины и высоты слоя свежеложенной бетонной смеси в лаборатории АО «Институт «Оргэнергострой» был выполнен натурный эксперимент. Эксперимент включал в себя разработку и изготовление специальной поршневой установки, позволяющей моделировать давление бетонной смеси, эквивалентной высоте 5,2 м, что соответствует максимально высоте АОБ. Поршневая установка (рис.1) включает камеру прямоугольного сечения 200×200 мм со свободно перемещающимся в ней поршнем. Камера выполнена в виде металлического каркаса, в двух противоположных сторонах которого по всей высоте были установлены листы ламинированной фанеры, а в двух других сторонах в нижней части имелись проемы, в которые устанавливали исследуемые элементы (сталефибробетонные листы толщиной 30 мм с различными величинами зазора).



1 – опора, 2 – рабочая зона для установки исследуемого элемента, 3 – листы ламинированной фанеры, 4 – металлический каркас, 5 – рычаг, 6 – поршень, 7 – исследуемый зазор

Рис. 1. – Схема установки (а) и ее общий вид (б)

При испытании в установку заливали бетонную смесь слоем высотой 0,5 м. Моделирование давления слоя укладываемой бетонной смеси заданной высоты создавали, передавая на уложенный слой бетонной смеси через поршень дополнительную нагрузку, создаваемую с помощью рычага. Для этого в камеру помещали поршень, и с помощью рычага и набора грузов прикладывали к нему дополнительное усилие. Нагрузку на поршень определяли по соотношению плеч приложения усилий (рис.1 а).

Для контроля давления бетонной смеси на дно камеры был помещен преобразователь давления, состоящий из мембраны наполненной водой и подключенной к манометру с диапазоном измерения давления от 0 до 0,2 МПа. Сравнение расчетного значения давления бетонной смеси с давлением, измеренным в эксперименте по манометру, показало, что расчетное давление отличалось от измеренного по манометру в пределах 5 % (рис. 2), что подтверждает работоспособность способа измерения

давления бетонной смеси, который может быть рекомендован для дальнейших натурных исследований.

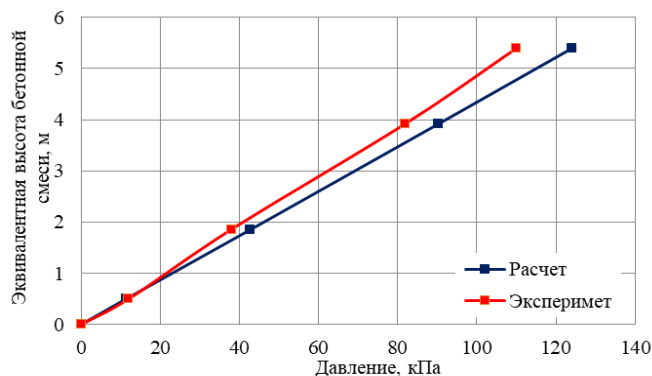


Рис. 2. – Результаты измерения давления бетонной смеси

Для экспериментов использовали самоуплотняющуюся бетонную смесь с распылом стандартного конуса 62 см (таблица 1).

Таблица № 1

Состав самоуплотняющейся бетонной смеси

Материал	Расход на 1 м ³ , кг
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108-2016	626
Вода	212
Песок кварцевый	550
Щебень гранитный фракции 5-10 мм	792
Микрокремнезем по ТУ 5743-048-02495332-96	62
Суперпластификатор Sika VC 5600 по ТУ 2493-005-13613997-2008	10

При исследовании варьировался тип кромки листа (прямоугольная и угловая) и размер зазора между листами (от 1 до 20 мм). Часть стыков была дополнительно уплотнена самоклеящейся армированной лентой НИКОБЕНД™ по СТО 72746455-3.1.6-2014 шириной 50 мм. Ленту наклевали с внешней стороны сталефибробетонного листа. Перед наклейкой поверхность листов очищали и обезжиривали. Указанный способ заделки может быть рекомендован для герметизации стыков в построечных условиях.

Были рассмотрены следующие варианты стыков:

- с прямоугольными и угловыми кромками с зазором 1 мм;
- с прямоугольными кромками с зазором 3, 5, 8, 12, 15, 20 мм при наличии и отсутствии наклеенной ленты.

При исследовании стыка СФБО опалубки с зазором 1 мм установлено, что в случае прямоугольных кромок не отмечено выдавливания бетонной смеси даже при давлении 120 кПа (эквивалентно высоте слоя бетонной смеси 5,2 м). Наличие угловых кромок приводит к появлению бетонной смеси на поверхности с первых этапов испытания (8 кПа) (рис.3). При этом увеличение давления бетонной смеси не приводит к дальнейшему ее выдавливанию. Следует отметить, что наличие угловых кромок гарантирует полное заполнение стыка монолитным бетоном, но требует дополнительных работ по подготовке поверхности к нанесению защитных покрытий.



Рис. 3. – Выдавливание бетонной смеси при наличии угловых кромок

При проведении исследований зазоров СФБО в диапазоне 3...8 мм с прямоугольными кромками и без установки самоклеящейся ленты установлено, что бетонная смесь начинает выдавливаться на поверхность стыка при давлении выше 40 кПа, что соответствует высоте слоя бетонной смеси 1,8 м. Следует отметить, что после выхода незначительного количества

цементного теста процесс выдавливания прекратился и даже при достижении давления в 120 кПа не возобновлялся (рис. 4). Крупный заполнитель закупоривает зазоры и препятствовал дальнейшему выдавливанию смеси. Заполненность шва по высоте оказалась неравномерной, что приводит к необходимости последующих дополнительных мероприятий по его заделке (специальными герметиками или цементно-песчаным раствором). Заделка стыка до укладки бетонной смеси может оказаться малоэффективной, так как при восприятии давления СФБО будет деформироваться. Эффективным будет применение специальных вязких герметизирующих средств, способных при смещении листов обеспечивать целостность и адгезионную прочность со СФБО.



Рис. 4. – Выдавливание бетонной смеси при величине зазора 8 мм

Для зазоров шириной более 8 мм с учетом фракции гранитного щебня 5-10 мм использовалась самоклеящаяся лента. Установлено, что при зазорах от 8 до 15 мм, включительно, самоклеящаяся лента обеспечивает восприятие давление в зоне шва от бетонной смеси в 120 кПа. При этом за лентой шов с прямоугольной кромкой СФБО оказался полностью заполнен для зазоров

более 8 мм. При величине зазора более 15 мм используемая лента не выдерживала нагрузки и отрывалась при давлении выше 100 кПа.

В результате эксперимента также было показано, что зазоры между листами СФБО шириной до 8 мм включительно при бетонировании АОБ могут остаться незаполненными раствором смеси, т.е. имеет место, так называемая, «пустошовка». Наличие «пустошовки» недопустимо, поэтому потребуется проведение дополнительных работ по заделке образующихся швов. Для получения стыков листов без "пустошовки" зазор следует заполнять специальными герметиками на эпоксидной основе либо изготавливать СФБО с внутренней разделкой (Рис.5). Разделка может быть устроена на стадии изготовления СФБО за счет применения бортов требуемой геометрии.

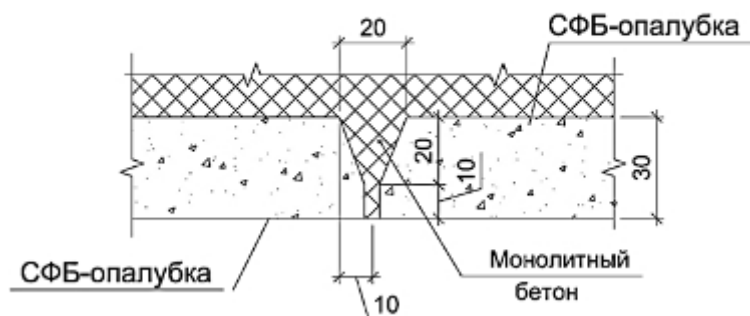


Рис. 5. – Разделка кромок СФБО

Также следует отметить, что наличие стыков между СФБО ограничивает возможность использования ее в качестве несущего конструктивного элемента. При разработке рабочей документации следует минимизировать количество стыков, а в случае их устройства предусматривать дополнительное армирование.

Выполненные эксперименты позволяют сделать следующие практические выводы:

1. Разработанная и изготовленная испытательная рычажная установка позволяет в лабораторных условиях моделировать давление, эквивалентное высоте слоя свежееуложенной бетонной смеси более 5 м.
2. При использовании несъемной СФБО при наличии зазоров до 3 мм включительно допускается не предусматривать специальные мероприятия по герметизации стыков. Выступающую на поверхность после бетонирования смесь следует счищать специальным инструментом перед подготовкой поверхности к окрашиванию (при необходимости).
3. При наличии зазоров от 3 до 8 мм включительно требуется проводить их герметизацию либо устраивать внутреннюю разделку по рисунку 5.
4. При наличии зазоров более 8 мм требуется предусматривать специальные мероприятия по герметизации швов до бетонирования. Допускается использовать армированные самоклеящиеся ленты (например НИКОБЕНД™ по СТО 72746455-3.1.6-2014) шириной от 50 мм для зазоров шириной до 15 мм включительно либо монтировать временные инвентарные нащельники из ламинированной фанеры.

Литература

1. Дорф В.А., Красновский Р.О., Капустин Д. Е., Султыгова П.С. На пути к реализации технологии возведения зданий и сооружений АЭС из армоблоков с несъемной сталефибробетонной опалубкой // Строительство в атомной отрасли. 2020. № 1. С. 47-54.
2. Зимин С.С., Алексеев Н.С. Конструктивные и технологические решения объемных армоблоков с несъемной несущей сталефибробетонной опалубкой // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 11(55). С. 193-203.
3. Дорф В.А., Красновский Р. О., Капустин Д. Е., Нуриев Р. Р. Несъемная сталефибробетонная опалубка как несущий элемент железобетонных

конструкций // Северный регион: наука, образование, культура. 2015. № 2-2(32). С. 148-153.

4. Денисов А.В., Зайцев Д.В. Прогнозирование стойкости сталефибробетонов к термическому воздействию при различных параметрах дисперсного армирования // Инженерный вестник Дона. 2022. №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7629.

5. Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. Опыт системной экспериментальной оценки современных высокотехнологичных бетонов по комплексу критериев сопротивления разрушению // Бетон и железобетон. 2021. № 1(603). С. 30-39.

6. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. Монография. М.: Издательство АСВ. 2011. 642 с.

7. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Анализ поведения фибробетона, армированного различными видами фибры, под нагрузкой // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году: Сборник научных трудов РААСН / Российская академия архитектуры и строительных наук. Том 2. – Москва: Издательство АСВ. 2022. С. 358-363.

8. Талантова К. В. Несъемная опалубка из сталефибробетонных гнутых профилей // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. № 7(703). С. 13-20.

9. Набокова Я.С. Эффективные строительные материалы и способы возведения зданий // Инженерный вестник Дона. 2008. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2008/96.

10. Фролов А. А. Экспериментальные исследования прочности и деформативности тонкостенных конструкций с блочными швами в

несъемной опалубке // Промышленное и гражданское строительство. 2009. № 7. С. 31-32.

11. Gomez-Serrano J., Espel R., Grima R., Burry M.C., Aguado A. Evolution of the formwork used in the temple of the Sagrada Família Int. J. Architect. Herit., 3 (2) (2009), pp. 93-109.

12. Ferrara L., Ozyurt N., Prisco M. High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites: the role of «casting-flow induced» fibre orientation // Materials and Structures 2011. 44(1). pp. 109–28.

13. Фомин Н. И. Исследование технологии устройства сборно-монолитных стен в несъемной железобетонной опалубке // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 5(40). С. 131-136.

References

1. Dorf V.A., Krasnovskij R.O., Kapustin D. E., Sultigova P.S. Stroitel'stvo v atomnoj otrasli. 2020. № 1. pp. 47-54.

2. Zimin S.S., Alekseev N.S. Sovremenny`e nauchny`e issledovaniya i innovacii. 2015. № 11(55). pp. 193-203.

3. Dorf V.A., Krasnovskii R. O., Kapustin D. Ye., Nuriev R. R. Severnii region: nauka, obrazovanie, kultura. 2015. № 2-2(32). pp. 148-153.

4. Denisov A.V., Zajcev D.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7629.

5. Chernyshov E.M., Korotkih D.N. Beton i zhelezobeton. 2021. № 1(603). pp. 30-39.

6. Rabinovich F.N. Kompozity na osnove dispersno armirovannyh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tehnologija, konstrukcii [Composites based on dispersed reinforced concrete. Issues of theory and design, technology, designs]. ASV. 2011. 642 p.

7. Puharenko Ju.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Fundamental'nye, poiskovyie i prikladnye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniju



razvitiya arhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noj otrasli Rossijskoj Federacii v 2021 godu: Sbornik nauchnyh trudov RAASN. Rossijskaja akademija arhitektury i stroitel'nyh nauk. Tom 2. ASV. 2022. pp. 358-363.

8. Talantova K. V. Izvestiya visshikh uchebnykh zavedenii. Stroitelstvo. 2017. № 7(703). pp. 13-20.

9. Nabokova Ya.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2008. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2008/96

10. Frolov A. A. Promishlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo. 2009. № 7. pp. 31-32.

11. Gomez-Serrano J., Espel R., Grima R., Burry M.C., Aguado A. J. Architect. Herit, 3 (2) (2009), pp. 93-109.

12. Ferrara L., Ozyurt N., Prisco M. Materials and Structures 2011. 44(1): pp.109–28.

13. Fomin N. I. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2013. № 5(40). pp. 131-136.

Дата поступления: 4.11.2025

Дата публикации: 26.12.2025