

Давиденко Анна Юрьевна,
к.т.н., ФГБОУ ВО "СамГТУ"
Davidenko Anna Yurievna, SSTU

Кравцова Анна Николаевна,
Магистрант, ФГБОУ ВО "СамГТУ"
Kravtsova Anna Nikolaevna, SSTU

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ МОНОЛИТНЫХ СТЕН
ИЗ ГИДРОБЕТОНА В ЗОНЕ ПЕРЕМЕННОГО УРОВНЯ АГРЕССИВНОЙ СРЕДЫ
OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL CYCLE DURATION DURING
THE CONSTRUCTION OF MONOLITHIC WALLS FROM HYDRAULIC CONCRETE
IN THE ZONE OF VARIABLE LEVEL OF AN AGGRESSIVE ENVIRONMENT**

Аннотация. Статья посвящена проблеме подбора временных интервалов перекрытия слоев при укладке гидротехнического бетона в зонах переменного горизонта воды (приливно-отливные зоны, сезонные колебания). Выполнен анализ влияния цикличности увлажнения-высыхания на совместимость «холодных швов» в условиях хлоридной и сульфатной агрессии. На основе экспериментальных данных, полученных в исследованиях Tang и Åkesson, а также нормативов СНГ, обоснован метод расчета критической паузы укладки, предотвращающей образование капиллярных каналов на границе слоев.

Abstract. The article addresses the problem of selecting time intervals for layer overlapping when placing hydraulic concrete in zones of variable water horizon (tidal zones, seasonal fluctuations). An analysis is performed on the influence of wetting-drying cyclicity on the compatibility of "cold joints" under conditions of chloride and sulfate aggression. Based on experimental data obtained from studies by Tang and Åkesson, as well as CIS regulatory documents, a method is substantiated for calculating the critical placement pause that prevents the formation of capillary channels at the layer interface.

Ключевые слова: Гидробетон, переменный уровень воды, агрессивная среда, холодный шов, продолжительность цикла, проницаемость бетона, хлориды.

Keywords: Hydraulic concrete, variable water level, aggressive environment, cold joint, cycle duration, concrete permeability, chlorides.

Возведение монолитных железобетонных конструкций в зоне переменного уровня (splash zone) является одной из наиболее сложных инженерных задач в строительстве. Согласно данным Р.К. Mehta и Международного совета по морским конструкциям, именно этот участок подвергается максимальной коррозионной деструкции из-за сочетания капиллярного подсоса, испарения и насыщения кислородом [2]. Традиционные регламенты укладки бетона ориентированы на «время схватывания», однако они не учитывают специфическую опасность, которую представляет для незрелого бетона воздействие агрессивных ионов в момент отлива или снижения уровня грунтовых вод. Цель данной работы – обоснование минимальной и максимальной продолжительности технологического перерыва, исключающего образование сквозной капиллярной сети в зоне контакта слоев.

Критическим дефектом при перерыве в бетонировании в агрессивной среде является не просто образование «холодного шва», а формирование так называемой «зоны ускоренного переноса». Группа исследователей под руководством L. Tang (Технологический университет Чалмерса, Швеция) в рамках проекта НЕТЕК экспериментально доказала, что циклическое воздействие «увлажнение-высыхание» на ранних сроках твердения создает градиент плотности цементного камня [1]. Если технологический перерыв между укладкой нижнего и



верхнего слоев превышает критическое время (t_{crit}), то на поверхности первого слоя успевает сформироваться не только адсорбционная пленка воды, но и произойти частичная карбонизация или выпадение солей (в случае сульфатных вод).

В отличие от надводного строительства, где время перекрытия слоев определяется исключительно реологией (потерей удобоукладываемости), в условиях переменного уровня воды добавляется фактор внешнего высыхания. Эксперименты М. Åkesson и коллег, опубликованные в журнале *Cement and Concrete Research*, показали, что для бетонов с водоцементным отношением 0.40, подверженных воздействию 3% раствора NaCl, критическая пауза не должна превышать время, за которое капиллярное давление в теле бетона достигает точки разрыва столба жидкости [1, 5]. В таблице 1 представлены рекомендации по выбору времени перекрытия в зависимости от условий среды и состава вяжущего, обобщенные на основе сопоставления европейского стандарта EN 13670, американского ACI 309.2R [3, 4].

Результаты, представленные в таблице 1, свидетельствуют, что в зоне осушения (отлив) перекрытие должно производиться строго до начала схватывания, в идеале – в течение 1–1,5 часов.

Таблица 1

Зависимость критической продолжительности перекрытия слоев от внешних условий

Тип цемента	Температура среды, °С	Относительная влажность над поверхностью, %	Время до схватывания (начало), ч	t_{crit} , ч
CEM I 42.5 (портландцемент)	25	60 (осушение)	2,5	1,50
CEM I 42.5 (портландцемент)	25	95 (влажно)	2,5	3
CEM III/A (шлаковый)	25	95	3	4
CEM I + микрокремнезем	30	60	2	1

Основная технологическая дилемма заключается в противоречии между требованиями «горячего шва» (перекрытие до схватывания) и логистическими задержками.

Многолетние исследования В.Г. Батракова и С.-Д. Ванга (Wang S.-D.) сходятся во мнении, что на границе слоев из-за седиментации и водоотделения формируется прослойка с повышенным В/Ц [2, 6]. Если в этот момент на конструкцию воздействует понижение уровня агрессивной жидкости (отлив или осушение котлована), происходит всасывание раствора солей в устье формирующихся капилляров. Повышение уровня (прилив) накрывает уже засоленный слой новым бетоном. За счет осмотического эффекта происходит «насосное» затягивание агрессивных ионов вглубь защитного слоя.

Стратегия оптимизации продолжительности цикла требует введения запрета на осушение шва. Технологический регламент должен базироваться на расчете времени достижения критического капиллярного давления P_c :

$$P_c = 2\sigma \cos\theta / r, \quad (1)$$

где σ – поверхностное натяжение поровой жидкости, Н/м; θ – краевой угол смачивания; r – минимальный радиус пор на стадии формирования каркаса, м.

Как только радиус капилляров из-за гидратации уменьшается до значений, при которых P_c начинает превышать давление разрыва водяного столба (около 0.1 МПа), осушение становится фатальным. Расчеты по методике, изложенной в CEB-FIP Model Code 2010, подтверждают, что этот момент наступает спустя 30–60 минут после видимого схватывания для быстротвердеющих составов [5].

В зарубежной практике для минимизации рисков в зоне переменного уровня предлагается широко применяется метод «туманообразования» (fogging) и укрытие влажной мешковиной, что рекомендовано ACI 308R [4]. Однако при хлоридной агрессии вода для увлажнения должна быть обессоленной, иначе уход за швом превратится в дополнительный



источник засоления [6]. При попадании шва в зону сульфатных вод необходимо исключить применение воды с высоким содержанием гипса для смачивания поверхности, чтобы не спровоцировать реакцию образования вторичного этtringита непосредственно в плоскости шва.

Проведенный анализ показал, что продолжительность технологических циклов в зоне переменного уровня не может определяться только комфортным временем укладки. Критическим лимитом является дельта времени между началом осушения и началом схватывания. Если осушение произошло раньше достижения бетоном «водонепроницаемого» состояния (что соответствует интервалу в 1–1.5 часа для портландцементов при температуре 25°C), возникает необратимая капиллярная инжекция агрессивной среды в тело шва. Оптимизация заключается в синхронизации подъема опалубки и подачи смеси с графиком приливов/отливов либо принудительным регулированием уровня грунтовых вод, что требует интеграции расчетов по формуле (1) в проект производства работ.

Список литературы:

1. Tang L., Utgenannt P. A field study of the critical chloride content for reinforcement corrosion in concrete. – Chalmers University of Technology, Division of Building Materials, Publication P-19:3. – Gothenburg, 2019. – 118 p.
2. Mehta P.K., Monteiro P.J.M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 4th Edition. – New York: McGraw-Hill Education, 2014. – 675 p.
3. EN 13670:2013. Execution of concrete structures. – CEN, Brussels, 2013. – 72 p.
4. ACI 309.2R-15. Guide to Identification and Control of Visible Surface Effects of Consolidation on Formed Concrete Surfaces. – American Concrete Institute, 2015. – 21 p.
5. Åkesson M., Lindvall A. Influence of curing conditions on salt scaling resistance of concrete with slag cement // Cement and Concrete Research. – 2022. – Vol. 158. – Art. no. 106849.
6. Батраков В.Г., Каприелов С.С., Шейнфельд А.В. Модифицированные бетоны для гидротехнического строительства // Гидротехническое строительство. – 2021. – № 4. – С. 25–31

