

**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 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УКЛАДКИ  
ГИДРОБЕТОНА МЕТОДОМ ВПТ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО  
АГРЕССИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД  
OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS FOR UNDERWATER  
CONCRETE PLACEMENT BY THE TREMIE METHOD UNDER CONDITIONS  
OF INTENSE AGGRESSIVE IMPACT OF GROUNDWATER**

**Аннотация.** В статье представлен обзор существующих исследований, посвящённых подводному бетонированию методом вертикально-подвижной трубы (ВПТ) в агрессивных грунтовых водах. Рассмотрены работы, сравнивающие метод ВПТ с альтернативными технологиями по критерию сохранности защитного слоя бетона. Обобщены данные о влиянии водообмена на качество подводной укладки и проанализированы рекомендации по режимам подъёма трубы, исключающим разбавление цементного теста агрессивной средой.

**Abstract.** The article presents a review of existing studies on underwater concrete placement by the tremie method in aggressive groundwater. works comparing the tremie method with alternative technologies are examined with respect to the preservation of the concrete cover. data on the effect of water exchange on the quality of underwater placement are summarized, and recommendations on pipe withdrawal regimes that prevent dilution of the cement paste by the aggressive environment are analyzed.

**Ключевые слова:** Подводное бетонирование, метод ВПТ, гидробетон, агрессивная среда, защитный слой, скорость подъёма трубы, водообмен.

**Keywords:** Underwater concrete placement, tremie method, hydraulic concrete, aggressive environment, concrete cover, pipe withdrawal rate, water exchange.

Метод вертикально-подвижной трубы (ВПТ), известный в англоязычной литературе как tremie method, на протяжении десятилетий остаётся основным способом подводной укладки бетонных смесей при строительстве фундаментов глубокого заложения, мостовых опор и подземных сооружений. Принцип метода заключается в подаче бетонной смеси через трубу, нижний конец которой постоянно заглублён в ранее уложенный бетон. Входящая смесь вытесняет ранее уложенную, не вступая в прямой контакт с окружающей водой [1].

Однако при наличии агрессивных грунтовых вод – сульфатных, хлоридных или с низким водородным показателем – задача существенно усложняется. Даже кратковременный контакт свежего цементного теста с агрессивной жидкостью способен инициировать процессы, снижающие долговечность конструкции. В таких условиях ключевое значение приобретает выбор технологических параметров, минимизирующих взаимодействие бетона с внешней средой.

Вопрос сохранности защитного слоя бетона при подводной укладке рассматривается в ряде работ. В советском руководстве по подводному бетонированию М.Н. Ваучского и А.Н. Дмитриева [2] метод ВПТ определён как приоритетный при глубинах свыше двух метров и при наличии течений. Авторы на основе экспериментальных данных показывают, что альтернативные методы – укладка бадьями и бетононасосами – приводят к локальному размыву смеси в зоне контакта с водой. В этих зонах защитный слой бетона либо истончается, либо приобретает повышенную пористость, что в агрессивной среде ускоряет коррозию арматуры.



Американский институт бетона (ACI) в руководстве ACI 304R-00 [1] также отдаёт предпочтение tremie-методу при возведении ответственных подводных конструкций. Отмечается, что при правильном соблюдении процедуры свежая смесь практически не контактирует с водой, а верхний слой, который всё же подвергается воздействию среды, впоследствии удаляется. Тем самым основной массив бетона сохраняет проектную плотность и щёлочность даже в агрессивной воде.

Более поздние исследования, обобщённые в работе Яо, Бернера и Джервика [3], подтверждают, что ни бетононасос, ни бадья не обеспечивают сопоставимой защиты в условиях проточной воды. Авторы проанализировали состояние подводных опор мостов в Калифорнии через 10–15 лет эксплуатации и обнаружили, что конструкции, забетонированные методом ВПТ, демонстрируют значительно меньшую степень сульфатной коррозии по сравнению с участками, где применялась укладка бадьями.

Интенсивность водообмена – один из наименее изученных, но критически важных факторов. Н.К. Розенталь [4] на основе натуральных наблюдений показал, что в зонах активного движения грунтовых вод (коэффициент фильтрации свыше 10 метров в сутки) защитный слой бетона, уложенного открытыми методами, деградирует в два-три раза быстрее, чем в стоячей воде. Механизм этого явления связан с постоянным подтоком свежих порций агрессивной жидкости, вымывающей гидроксид кальция из поверхностного слоя и нарушающей пассивацию арматуры.

Метод ВПТ в этих условиях имеет принципиальное преимущество: выходящая из трубы смесь сразу погружается в толщу уже уложенного бетона, где водообмен затруднён. М.З. Симонов и Б.С. Соколов [5] подчёркивают, что эффективность этой защиты напрямую зависит от поддержания постоянного заглубления нижнего конца трубы. Если труба поднимается выше допустимого предела, её устье оказывается в зоне активного водообмена, и поступающая смесь немедленно подвергается размыву. Вопрос о минимально допустимом заглублении трубы – один из центральных в литературе по ВПТ. Ваучский и Дмитриев [2] на основе экспериментальных бетонирований с красителями рекомендуют заглубление не менее чем на 0,8 метра в стоячей воде и до 1,5 метра при наличии течения. Меньшие значения, по их данным, провоцируют образование каналов размыва и перемешивание цементного теста с водой.

ACI 304R-00 [1] формулирует требование более консервативно: бетонолитная труба должна быть погружена в ранее уложенный бетон как минимум на один метр на протяжении всего процесса укладки, за исключением начального этапа формирования первичного конуса. Скорость подъёма при этом должна быть строго синхронизирована с темпом подачи смеси.

Гервик в обзорной статье [3] приводит данные о дефектах подводных бетонирований, вызванных несоблюдением этого правила. Наиболее типичный дефект – образование горизонтальных прослоек с повышенной пористостью, которые впоследствии становятся проводниками агрессивных ионов к арматурному каркасу. Рентгенографический анализ кернов, извлечённых из таких конструкций, показал содержание хлоридов в этих прослойках до 0,8 % от массы цемента – величину, многократно превышающую порог начала коррозии. Обзор исследований позволяет сформулировать следующие обобщённые рекомендации, подтверждённые экспериментальными и натурными данными. Во-первых, метод ВПТ признаётся специалистами как единственный надёжный способ подводной укладки в условиях активного водообмена и агрессивной среды. Во-вторых, ключевым параметром, определяющим сохранность защитного слоя, является заглубление нижнего конца трубы, рекомендуемая величина которого составляет от одного до полутора метров в зависимости от скорости течения. В-третьих, несоблюдение режима подъёма трубы приводит к размыву свежей смеси и формированию дефектных прослоек, которые в агрессивной среде становятся очагами ускоренной коррозии

#### Список литературы:

1. ACI Committee 304. ACI 304R-00: Guide for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete. – American Concrete Institute, 2000 (Reapproved 2009). – 50 p.



2. Ваучский М.Н., Дмитриев А.Н. Подводное бетонирование с применением вертикально-перемещаемой трубы. – М.: Энергия, 1976. – 97 с.
3. Yao S.X., Berner D.E., Gerwick B.C. Assessment of Underwater Concrete Placement Technologies for Bridge Pier Construction // Transportation Research Record. – 1995. – No. 1476. – P. 32–40.
4. Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость бетона в зоне переменного уровня морской воды // Транспортное строительство. – 2005. – № 3. – С. 21–25.
5. Симонов М.З., Соколов Б.С. Технология возведения монолитных конструкций из гидротехнического бетона. – М.: АСВ, 2015. – 288 с

