

Предел нам — только небо

Эволюция в строительстве небоскребов

РЕФЕРАТ. Статья* посвящена совершенствованию технологии бетонирования при строительстве высотных зданий в течение последних десятилетий, осуществлявшемуся в основном благодаря использованию высокоэффективных добавок для бетонных смесей. В результате при строительстве небоскребов произошел переход от стальных конструкций к преобладанию железобетона. Описан ряд проектов строительства небоскребов все большей высоты, увеличение которой достигалось благодаря росту прочности применявшегося при их строительстве бетона и возможностей по закачиванию бетонной смеси высоко вверх при помощи насосов.

Ключевые слова: высококачественный бетон, железобетон, реология бетона, водопонижающие добавки.

Keywords: high-performance concrete, reinforced concrete, concrete rheology, water-reducing admixtures.

За последние 50 лет в технологии бетонирования произошли значительные изменения. В основном они обусловлены новыми возможностями регулирования реологии бетонных смесей, появившимися благодаря применению высокоэффективных водопонижающих и реологических добавок. Иными словами, реология бетонных смесей теперь зависит не только от расхода воды, но и от тщательно сбалансированного соотношения между количеством воды и дозировками добавок.

Понижение водоцементного соотношения (В/Ц) или соотношения вода/вяжущее (В/В) обеспечивает сближение частиц вяжущего в твердеющем цементном тесте, вследствие чего прочность при сжатии может достичь 100 МПа — даже несмотря на то, что в таком бетоне содержится недостаточно воды для полной гидратации частиц цемента. Прочность при сжатии возрастает с уменьшением В/Ц или В/В, поскольку прочность бетона в большей степени зависит от расстояния между частицами цемента, чем от степени

гидратации последнего. Закон Фере для цементного теста и закон Абрамса для бетона остаются в силе даже в том случае, когда не все частицы цемента прогидратированы.

До 1970-х годов было невозможно изготовить бетонные смеси с осадкой конуса порядка 100 мм при В/Ц менее 0,4. Единственными доступными в то время на рынке водопонижающими добавками были лигносульфонаты, но они не обладали эффективностью, достаточной для достижения такой подвижности. С того момента, как в Германии [1], а затем в Японии [2] были открыты высокоэффективные свойства соответственно полимеламин- и полинафталинсульфонатов, стало возможным производить смеси с соотношением В/Ц менее 0,4 и осадкой до 200 мм.

Эти две инновации позволили достичь значительного преимущества бетона над сталью при строительстве небоскребов. Больше не требуется использовать краны для подъема и укладки бетона. С помощью реологических добавок можно перекачивать бетонные смеси с первого этажа на последний. Так, при строительстве небоскреба Бурдж-Халифа в Дубае бетонную смесь закачивали на высо-

ту 606 м при помощи одного-единственного бетононасоса. Предполагается, что в ближайшем будущем возможности бетононасосов достигнут отметки в 1000 м. Впрочем, стальные колонны и балки все равно придется поднимать кранами.

В этой статье описано, как при строительстве небоскребов происходил переход от стальных конструкций к преобладанию железобетона — на примерах сооружений, выстроенных с 1968 года до настоящего времени.

Статью можно разделить на две части. Первая из них посвящена зданиям, построенным с применением лигносульфонатов — Уотер Тауэр Плейс (1968, Чикаго) и Си-Эн Тауэр (1973, Торонто). Она характеризует состояние технологии до 1975 года, когда появились высокоэффективные водопонижающие добавки. Во второй части вкратце описано строительство небоскребов уже с этими добавками: Скотия Плаза (1983, Торонто), Ту Юнион-сквер (1989, Сизтл), Башни Петронас (1998, Куала-Лумпур), Бурдж-Халифа (2010, Дубай), пока безымянный проект Ворли в Мумбае (в процессе строительства) и ожидаемый Кингдом Тауэр в Джидде (строительство началось в 2013 году).

Эпоха лигносульфонатных водопонижающих добавок

Уотер Тауэр Плейс. В 1960-х самым высоким достижением прочности бетона было значение 30 МПа при осадке конуса бетонной смеси 100 мм (Чикаго). Этот бетон использовался для возведения колонн при строительстве небоскребов до тех пор, пока Джон Албингер не обнаружил, что при тщательном подборе цемента, золы-уноса и водопонижающих добавок можно увеличить этот показатель вдвое [3].

Чтобы внедрить свой высокопрочный бетон на рынок, он попросил инженера и архитектора одного из возводимых небоскребов сделать одну несущую колонну из его бетона

* Перевод статьи публикуется с любезного разрешения издателя журнала Concrete International.



Рис. 1. Высотные здания, построенные до 1975 года: а — Уотер Тауэр Плейс, Чикаго, США (фото предоставлено Джереми Атертоном ©); б — Си-Эн Тауэр, Торонто, Канада (фото публикуется с любезного разрешения Бенсона Куа)

БЕТОН

прочностью 40 Мпа, что не требовало увеличения затрат. Предложение было принято. Уже на следующий день невозможно было обнаружить различия между его бетоном и тем, который имел прочность 30 МПа и использовался при возведении остальных колонн в этом проекте.

Архитектору понравилось, что можно сделать колонны тоньше, и он попросил своего инженера разработать проект следующего небоскреба уже с учетом использования бетона прочностью 40 МПа. Тому тоже понравилась идея избавиться от лишней массы. Когда же строили это здание, Албингер повторил маневр и попросил разрешения поставить одну опору из бетона прочностью 52 МПа, что опять же не требовало дополнительных затрат.

То же самое случилось с бетоном прочностью 60 МПа, который позволил архитектору и инженерам создать следующее высотное здание — Уотер Тауэр Плейс (рис. 1, а). Здесь этот бетон использовался для строительства нижних этажей. К верхним этажам прочность бетона постепенно снижалась до 30 МПа. От этажа к этажу инженер изменял количество арматурной стали, и ему удалось сохранить одинаковый профиль всех несущих конструкций, так что можно было не изменять размеры заранее изготовленной арматуры. К тому же, поскольку с геометрической точки зрения все этажи были одинаковы, на оформление интерьера ушло гораздо меньше средств.

Си-Эн Тауэр. До недавней постройки Бурдж-Халифа самым высоким в мире отдельно стоящим зданием была башня Си-Эн Тауэр (482 м, Торонто, Канада, рис. 1, б). В строительстве использовали скользящую опалубку и применяли бетон, содержащий воздухововлекающую добавку, со средней прочностью 55 МПа [4]. Чтобы обеспечить

устойчивость к циклическому замораживанию-оттаиванию, потребовался именно бетон с воздухововлечением. Небоскреб строился с начала мая до конца ноября; средняя температура атмосферного воздуха изменялась в пределах от 35 до -10 °С. Поскольку толщина стен на нижних этажах достигала 2,1 м, необходимо было использовать цемент с низкой теплотой гидратации, чтобы уменьшить температурные градиенты. С похолоданием обычный портландцемент постепенно заменяли цементом с низкой теплотой гидратации.

Эпоха высокоэффективных водопонижающих добавок

Скотиа Плаза. Это здание в Торонто — привлекательный по внешнему виду 68-этажный офисный центр высотой 275 м, облицованный красным гранитом (рис. 2, а). Его каркас был выстроен методом скользящей опалубки из бетона без воздухововлечения с наибольшей проектной прочностью 70 МПа, т. е. максимальной прочностью, разрешенной в то время в Канадском строительном кодексе [5]. Для получения такой прочности использовали трехкомпонентную смесь портландцемента, шлакопортландцемента и микрокремнезема. Бетонная смесь готовилась при соотношении В/В = 0,3 и имела осадку конуса 175 мм; смесь перекачивали насосами от первого этажа до последнего.

С целью выполнения требований к максимальной температуре свежеприготовленного бетона (18 °С) его в жаркие дни июля охлаждали жидким азотом.

Ту Юнион-сквер. Сизтл (США) — это город сильных ветров. Чтобы минимизировать боковой изгиб конструкции, разработчики проекта здания решили создать жесткую смешанную структуру. Для этого было решено

поместить в стальные трубы бетон с модулем упругости, равным 50 ГПа (рис. 2, б) [6]. Для создания такого бетона производителю пришлось импортировать из соседней Канады особый ингредиент — ледниковый окатанный гранитный гравий с максимальным размером зерен 10 мм. Такой гравий имел ряд преимуществ вследствие того, что он образовался в результате постепенного и мягкого воздействия ледника, а не грубого воздействия дробилок. По этой причине образовались окатанные частицы, положительно влияющие на реологию бетонной смеси, но при этом поверхность частиц была шероховатой, что обеспечивало более прочное сцепление с цементным тестом (в отличие от речного гравия, отшлифованного мелкими осадочными породами). Чтобы достичь требуемого модуля упругости в 50 ГПа, необходимо было снизить значение В/В до 0,22. В результате прочность при сжатии достигла 130 МПа, хотя в проекте была заложена прочность всего 90 МПа [7].

Доставить на стройку бетонную смесь с соотношением В/В, равным 0,22, было (и до сих пор остается) нелегкой задачей вследствие ограничения во времени. Поэтому решили доставлять ее в выходные ночью, чтобы на дороге было как можно меньше автотранспорта. Чтобы задобрить жителей общины, подрядчик и поставщик бетона предложили бесплатно построить детскую площадку, которую город отказывался строить уже несколько лет. Также всем желающим бесплатно раздавали беруши для спокойного сна по ночам в выходные, когда привозили бетон. Жители с радостью согласились.

Башни Петронас. В канун 2000 года США потеряли первое место в списке стран, обладающих самыми высокими небоскреба-



Рис. 2. Высотные здания, построенные с использованием высокоэффективных водопонижающих добавок: а — Скотиа Плаза, Торонто, Канада (фото публикуется с любезного разрешения Джона Бикли); б — строительство Ту Юнион-сквер, Сиэтл, США (фото публикуется с любезного разрешения Вестона Хестера); в — Башни Петронас, Куала-Лумпур, Малайзия (фото публикуется с любезного разрешения Morio и Wikimedia Commons)

ми. Малайзийская государственная нефтяная корпорация Petronas решила выстроить в Куала-Лумпуре, столице Малайзии, здание высотой 451,9 м (в полтора раза выше, чем Эйфелева башня) в виде двух соединенных между собой башен. Башни (рис. 2, в) выстроены из бетона разной прочности; наиболее прочный бетон (80 МПа) использовался для опор нижних этажей [8].

Во время строительства этого здания инженеры компании Samsung сочли непрактичным поднимать на верхние этажи емкости с бетонной смесью, так как в их распоряжении было не слишком много подъемных кранов. Поэтому они развернули большую программу по разработке устройств для перекачивания высококачественного бетона насосами. Разработки продолжаются по сей день [9, 10].

Бурдж-Халифа. Это здание, расположенное в Дубае, ОАЭ (рис. 3, а), на сегодняшний день является самым высоким в мире. Его высота составляет 828 м. До 156-го этажа (586 м) оно выстроено из железобетона, и вплоть до высоты 606 м бетонную смесь доставляли с использованием единственного бетононасоса [11]. Верхняя часть башни сооружена из стальных конструкций, расположенных на вершине ее железобетонной части. Однако инженеры Samsung пришли к выводу, что возведение стальной части — дело сложное, затратное по времени и средствам, так как в их распоряжении было всего два подъемных крана. Оба крана днем и ночью доставляли наверх стальные детали, но было ясно, что уложиться в срок не удастся. В итоге Samsung попросила инженеров впредь разрабатывать здания только из бетона.

Проект Ворли. В индийском городе корпорация Samsung руководит возведением бетонного здания высотой 83 этажа. Снизу доверху весь бетон доставляют насосами. К ним напрямую подключены бетономешалки. Несущие колонны на нижних этажах сделаны из бетона с прочностью при сжатии 80 МПа и осадкой конуса 200 мм, а все бетонные плиты перекрытий между этажами — из наливного бетона с распылом 650 мм [12].

В настоящий момент это самый передовой проект в области строительства небоскребов (рис. 3, б). За это время мы далеко ушли от использования бетона с прочностью 60 МПа и осадкой конуса 100 мм и от необходимости поднимать его в кубелях, как это делалось при строительстве Уотер Тауэр Плейс в 1968 году.



Рис. 3. Самые высокие небоскребы: а — Бурдж-Халифа, Дубай, ОАЭ; б — строительство здания «Проект Ворли», Мумбаи, Индия (фото публикуется с любезного разрешения Пьера-Клода Айчина); в — модель Кингдом Тауэр, Джидда, Саудовская Аравия (фото предоставлено Адрианом Смитом и Гордоном Джиллом)

Кингдом Тауэр. Saudi Arabian Binladin Group подумывала о строительстве башни высотой 1,6 км — Кингдом Тауэр в Джидде, Саудовская Аравия (рис. 3, в). Но ее технические специалисты пришли к заключению, что вдвое превзойти высоту небоскреба Бурдж-Халифа (800 м) было бы нереально. Тем не менее проект постройки здания высотой 1000 м выглядит вполне осуществимым. Предусматривается использовать по очереди два расположенных последовательно бетононасоса, каждый из которых может транспортировать бетон на высоту 500 м. Для большей части здания планируется использовать самоуплотняющийся бетон. Для несущих опор его прочность при сжатии должна достигать 100 МПа. Для контроля качества материалов привлечена фирма Advanced Construction Technology Services, которая разместила для этого лабораторию непосредственно на месте строительства [13].

Зачем такие высокие?

Зачем нужно строить такие высокие здания? Вообразите себе великолепие высказывания: «Мы построили самое высокое здание в мире!» Но престиж такого рода эфемерен. Рано или поздно кто-то построит еще более высокое здание. Настоящая цель при достижении новых пределов высоты конструкций — это желание внести свой вклад в развитие практики обычного строительства. Благодаря рвущимся к новым высотам строителям, архитекторам, поставщикам материалов, инженерам и ученым в области материаловедения мы овладели такими технологиями изготов-

ления бетона, какие были немыслимы пятьдесят лет назад. И постепенно бетон заменяет сталь в качестве лучшего строительного материала для небоскребов.

С современными способами производства можно сделать бетон таким же прочным, как самые прочные природные камни, закачать его на высоту 600 м, а вскоре — и 1000 м, и сделать его удобоукладываемость настолько высокой, что во время заливки можно будет обойтись без виброуплотнения.

Далее, когда достигнута возможность доставлять высокопрочный бетон при помощи насосов на высоту 600 м, строительство зданий и сооружений высотой 200–300 м (50–80 этажей) уже представляется обычным делом. Согласно Кларку [14], в ближайшие годы такие 200–300-метровые здания будут преобладать среди небоскребов. При возведении таких конструкций довольно легко учесть все природные силы, которые будут воздействовать на здание. Для большей высоты такие расчеты становятся сложнее и дороже.

Заключение

Благодаря разработкам мощных водопонижающих и реологических добавок стало возможным возведение бетонных небоскребов высокоэффективными и экономически разумными способами. Совместными усилиями предпринимателей и изобретателей, одолевших рубежи возможностей использования бетона, мы можем закачивать бетон на все большую и большую высоту. Вероятно, небо действительно является единственным пределом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Meyer A. Experiences in the use of superplasticizers in Germany // Superplasticizers in Germany, SP-62, V.M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1979. P. 21–36.
2. Hattori K. Experiences with mighty superplasticizer in Japan // Superplasticizers in Germany, SP-62, V.M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1979. P. 37–66.
3. Water Tower Place — high strength concrete // Concrete Construction. 1976. Vol. 21, N 3. P. 100–104.
4. Bickley J.A. The CN Tower — a 1970's adventure in concrete technology // ACI Spring Convention 2012, address at the student lunch meeting, Toronto, ON, Canada, 2012. P. 20.
5. Ryell J., Bickley J.A. Scotia Plaza: high strength concrete for tall buildings // Symposium on Utilization of High Strength Concrete, Stavanger, Norway, 1987. P. 641–653.
6. Ralston M., Korman R. Put that in your pipe and cure it // Engineering News Record. Vol. 22, N 7, Feb. 1989. P. 44–53.
7. Howard N.L., Leatham D.M. The production and delivery of high-strength concrete // Concrete International. 1989. Vol. 11, N 4. P. 26–30.
8. Thornton C.H., Hungspruke U., Joseph L.M. Design of the world's tallest buildings—Petronas Twin Towers at Kuala Lumpur City centre // The Structural Design of Tall Buildings. 1997. Vol. 6, N 4, Dec. 1997. P. 245–262.
9. Kwon S.H., Park C.K., Jeong J.H., Jo S.D. et al. Prediction of concrete pumping: Part I—Development of new tribometer for analysis of lubricating layer // ACI Materials Journal. 2013. Vol. 110, No. 6. P. 647–655.
10. Kwon S.H., Park C.K., Jeong J.H., Jo S.D. et al. Prediction of concrete pumping: Part II—Analytical prediction and experimental verification // ACI Materials Journal. 2013. Vol. 110, N 6. P. 657–667.
11. Aldred J. Burj Khalifa — a new high for high-performance concrete // Proc. of the ICE — Civil Engineering. 2010. Vol. 163, N 2. P. 66–73.
12. Nehdi M.L. Only tall things cast shadows: opportunities, challenges and research needs of self-consolidating concrete in super-tall buildings // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 48. P. 80–90.
13. Concrete Quality-Control Lab to be onsite at Kingdom Tower // Concrete SmartBrief. Feb. 18, 2014.
14. Clark G. Challenges for concrete in tall buildings // Structural Concrete, accepted and published online, Nov. 2014. (<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/suco.201400011/full>).



В НОУ ДПО «Международная промышленная академия», имеющей более чем 45-летний опыт работы в области дополнительного профессионального образования (повышения квалификации и профессиональной переподготовки руководителей и специалистов промышленных предприятий), с 2008 года действует направление — «Технический прогресс в промышленности строительных материалов» (Государственная лицензия на образовательную деятельность № 002800 от 05.04.2012 г.). За прошедшее годы в образовательных мероприятиях Академии по этому направлению приняли участие руководители и специалисты более 40 предприятий цементной промышленности Российской Федерации, Узбекистана, Украины, Белоруссии, Казахстана. Занятия проводят ведущие специалисты и преподаватели ОАО «НИИ Цемент», Союзцемента, РХТУ им. Д.И. Менделеева, Ростехнадзора, Международной промышленной академии.



МЕЖДУНАРОДНАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ АКАДЕМИЯ

Государственная лицензия на образовательную деятельность № 002800 от 05.04.2012 г.

Приглашаем руководителей и специалистов цементной промышленности принять участие в следующих 72-часовых курсах повышения квалификации во 2-м полугодии 2015 года:

14–18 СЕНТЯБРЯ — курс для специалистов механических служб цементных предприятий по программе «Техническое обслуживание оборудования. Опыт модернизации действующего технологического оборудования. Нивелировка — инструментальная выверка и механическая наладка технологического оборудования»

ОКТАБРЬ — спецкурс для вновь вводимых предприятий и технологических линий «сухого» способа производства цемента «Современные технологии и оборудование»

Программами курсов предусмотрены выездные занятия на современные цементные предприятия. По результатам обучения слушатели получают удостоверение о повышении квалификации.

НОЯБРЬ — курс для руководителей «Роль руководителя структурного подразделения предприятия в обеспечении эффективности производства. Единые правила эксплуатации оборудования и ведения производственных процессов на предприятии — помол сырья, обжиг, помол цемента, отгрузка цемента»

ДЕКАБРЬ — спецкурс «Совершенствование методики проведения работ установками горизонтально-направленного бурения»

Адрес Академии и контакты для справок и заявок:
115093, Москва, 1-й Щипковский пер., д. 20
Тел. +7 (499) 235-71-47, факс +7 (499) 235-97-39
www.grainfood.ru

Кафедра инженерного обеспечения
Центр промышленности строительных материалов
Тел./факс +7 (499) 235-42-72, (499) 265-42-74
E-mail: getman@grainfood.ru, bukreev@grainfood.ru