

УДК 624.012.45

**О РАЦИОНАЛЬНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ И СИСТЕМАТИЗАЦИИ ОТЕЧЕСТВЕННОГО
ОПЫТА В ВОПРОСЕ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ, ДОЛГОВЕЧНОСТИ
И ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

*канд. техн. наук А.П. ЖУКБЯН, канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ,
В.В. СТИНКОВОЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Рассмотрены вопросы оценки технического состояния зданий и сооружений. Представлены методики расчета усиления неразрезных конструкций. Приведены результаты исследований комплексной добавки для строительных растворов, улучшающей эксплуатационно-технические характеристики кирпичной кладки.

В период активного роста промышленного производства в Республике Беларусь проблема повышения эксплуатационной надежности сооружений является важным условием обеспечения их длительной работы в сложных и непрерывных технологических процессах предприятий. Данному вопросу посвящено ряд научно-практических работ, акцентирующих внимание лишь на отдельных проблемах, связанных с повышением прочности и долговечности конструкций. Аккумулирование и точное применение имеющейся базы, а также накопленного опыта является основной задачей проектных институтов, научно-производственных и специализированных организаций.

В рамках данной статьи отражены лишь отдельные, однако немаловажные аспекты деятельности коллектива Проектного института реконструкции и строительства Полоцкого государственного университета (ПИРС УО «ПГУ»), связанные с оценкой технического состояния строительных конструкций и повышением их эксплуатационной надежности. Так, одно из направлений его работы – обследование зданий и сооружений нефтеперерабатывающих предприятий, и в частности таких, как железобетонные резервуары.

Цилиндрические железобетонные резервуары емкостью 10000 м³ (рис. 1) в составе парков хранения нефтепродуктов производственного объединения ОАО «Нафтан» используются более 40 лет. За это время накоплен определенный опыт их эксплуатации, а периодические обследования железобетонных конструкций сооружений выявили особенности их поведения в среде воздействия внешних факторов.



Рис. 1. Общий вид резервуара емкостью 10000 м³

Важной эксплуатационной характеристикой подземных резервуаров является их герметичность для жидкости, хранящейся внутри сооружения, а также грунтовых вод и атмосферных осадков, фильтрующихся сквозь грунт обваловки. Со стороны грунта резервуары имеют гидроизоляцию (наружный слой торкретбетона), предотвращающую воздействие грунтовых вод на бетон панелей цилиндрических стенок, и как следствие, его коррозию. Однако говорить о полной внешней герметичности сооружения преждевременно. По результатам проведенных обследований группы резервуаров парка хранения нефтепродуктов (более 10 шт.) в 2000...2006 годах были выявлены характерные повреждения стенок сооружений, а именно: в местах образования сквозных по отношению к конструкциям панелей трещин резервуаров

происходило периодическое проникновение атмосферных вод, о чем свидетельствуют белые высолы на поверхностях конструкций (коррозия бетона I вида). Причиной образования трещин являются растягивающие напряжения во внутренних волокнах панелей цилиндрических стенок от активного давления грунта обваловки и радиальных усилий от предварительного натяжения высокопрочной проволоочной арматуры внешней навивки. Стоит отметить, что вышеназванные напряжения проявляются в конструкциях лишь в свободном от нефтепродукта состоянии. Факт образования повреждений подтверждают проведенные поверочные расчеты сооружения в программно-вычислительном комплексе SCAD (г. Киев, Украина). Линия распределения растягивающих напряжений от действия внешней нагрузки совпадает с фактическим расположением трещин на внутренних поверхностях стенок (1,9...2,5 м от поверхности днища).

Наблюдения показывают, что за сорокалетний период наружный слой торкретбетона разрушается незначительно (на глубину около 5 мм). При нормальной толщине защитного слоя, выполненного из бетона с маркой по водонепроницаемости W8 (10...15 мм), навивочная арматура не имеет следов коррозии и корродирует в том случае, если толщина защитного слоя уменьшена против проектной до 1...5 мм. По данным исследований НИИЖБ (г. Москва), ориентировочный срок службы жертвенного слоя торкретбетона составляет 60...70 лет при прямом воздействии на него водной среды, после чего должен быть удален и заменен новым. При отсутствии данного воздействия процесс коррозии бетона протекает медленнее и долговечность конструкций сооружения увеличивается.

Обратная ситуация наблюдается с защитным слоем торкретбетона и бетонным покрытием, нанесенными на внутренние поверхности панелей цилиндрических стенок и днищ резервуаров, которые на большинстве конструкций были разрушены или повреждены. Как правило, составляющие нефтепродуктов химического воздействия на защитное покрытие не оказывают. Некоторые виды сернистых мазутов могут повысить степень агрессивности среды до слабоагрессивной или среднеагрессивной. В данном случае происходит кислотная коррозия [1], сопровождающаяся реакциями ионного обмена между гидратом окиси кальция, содержащегося в бетоне, и серной кислотой.

Скорость коррозии как внутреннего слоя торкретбетона, так и основного бетона стенок сооружений будет возрастать с увеличением концентрации серной кислоты. Однако негативное действие нефтепродуктов на бетон связывают с тем, что нефтепродукты при контакте с бетоном пропитывают его. За счет экранирующего влияния пленок нефтепродуктов дальнейшая гидратация цементных зерен не происходит; при этом резко уменьшается потенциал цементных зерен к самозалечиванию дефектов структуры, понижается прочность срастания новообразований цементного камня. При длительном контакте с нефтепродуктами прочность бетона уменьшается также за счет ослабления контактов между заполнителями бетона и цементным камнем, расклинивающего действия нефтепродуктов на трещины и другие дефекты структуры бетона, проявления эффекта адсорбционного понижения прочности. По этим же причинам в железобетонных сборных конструкциях (колонны внутреннего каркаса) снижается прочность сцепления цементного камня с арматурой. Степень уменьшения прочности бетона и сцепления его с арматурой зависит от плотности и возраста бетона. Чем больше пористость и меньше возраст бетона, тем больше снижение его прочности и прочности сцепления с арматурой по сравнению с бетоном, не подверженным действию нефтепродуктов.

Наиболее серьезный вопрос перед обследователями встал при проведении осмотра конструкций покрытий сооружений. Состояние монолитных железобетонных плит и второстепенных балок всех без исключения резервуаров после 40 лет эксплуатации было расценено как неудовлетворительное и предаварийное (IV...V категории). Повсеместное разрушение бетона конструкций сопровождалось оголением и коррозией преднапряженной проволоочной арматуры в расчетных сечениях. Степень ослабления прядей рабочей арматуры вследствие коррозии составляла 30...80 %. Учитывая неудовлетворительное состояние конструкций и наличие явных повреждений, свидетельствующих об этом, решение о демонтаже конструкций было принято на стадии проведения предварительного (визуального) обследования. Необходимо отметить, что ряд несущих ригелей покрытия, а также оголовков колонн внутренних каркасов сооружений были разморожены на глубину до 50...70 мм. При демонтаже конструкций из-за повреждений опорных площадок происходил срез бетона консолей оголовков колонн, и как следствие, обрушение примыкающих к ним ригелей. Что же явилось причиной столь активного разрушения конструкций?

Емкости хранения нефтепродуктов эксплуатируются в сложных условиях. Строительные конструкции резервуаров находятся в постоянном контакте с разогретыми нефтепродуктами при температуре +60 °C и выше. Наружные поверхности покрытий (заглубленных и полуглубленных) хранилищ испытывают естественные атмосферные воздействия: периодические замораживание-оттаивание, увлажнение, образование наледей, а иногда, при отсутствии эффективного теплогидроизоляционного покрытия внутри емкости нефтепродуктов, и сквозное промораживание конструкций в осенне-зимний период года. Основной причиной оголения и коррозии рабочей арматуры конструкций является дефект бетонирования конструкций, проявляющийся в малой толщине защитного слоя бетона, который под воздействием вышеназванных неблагоприятных факторов утратил свои защитные по отношению к рабочей арматуре свойства.

При проведении детального обследования при высоком уровне грунтовых вод предварительно необходимо знать их химический состав, так как содержание в них активных кислотообразующих ионов (в частности ионов SO_4^-) зачастую приводит к химической коррозии (III вида) бетона наружного защитного покрытия и цилиндрических стенок резервуаров.

Процесс детального обследования должен сопровождаться комплексными инженерными изысканиями, включающими в свой состав данные о пространственной геометрии резервуара, развертки прилегающих к сооружению шурфов, данные о состоянии грунтов основания и обратной засыпки (их физико-механические, прочностные и деформационные характеристики).

При проектировании реконструкции резервуаров в рамках строительной нормативной базы Республики Беларусь необходимо активно использовать накопленный отечественный, а также мировой опыт восстановления поврежденных конструкций сооружений, предназначенных для хранения нефтепродуктов. Наряду с обеспечением восстановления требуемых прочностных параметров конструкций пристальное внимание при проведении реконструкции должно уделяться продлению срока их службы (устройство эффективного теплогидроизоляционного покрытия, отмосток по периметру сооружения и т.д.).

Как подтверждает строительная практика, длительное высокотемпературное воздействие на конструкции сооружений при пожаре приводит к снижению прочностных характеристик их материалов, а в некоторых случаях и к полному их разрушению. После пожара необходимо адекватно оценить состояние конструкций, чтобы сделать заключение о возможности и методах их восстановления. Данное заключение выполняется на основании обследования сооружения в целом или отдельных конструкций. Все вышесказанное касается в первую очередь зданий и сооружений, имеющих важное народнохозяйственное значение, а также располагающихся на территориях пожаро- и взрывоопасных зон производственных предприятий.

Обследование конструкций сооружений проводят с целью:

- выяснения возможности пребывания в пределах сооружения людей и выполнения технологического процесса, для которого сооружение предназначено;
- выявления и ликвидации или ограждения опасных для людей зон, полностью или сильно разрушенных конструкций;
- принятия решения о дальнейших мерах, направленных на полную ликвидацию последствий пожара:
 - собственными силами;
 - с приглашением научно-исследовательских и проектных организаций для проведения детального обследования и разработки проекта восстановления сооружения в целом, а также его отдельных конструкций.

Нештатные ситуации на нефтеперерабатывающих предприятиях не редкость, однако пожар, произошедший на территории технологической установки АВТ-2 ОАО «Нафтан» в сентябре 2006 года, поставил перед необходимостью администрацию предприятия обратиться за квалифицированной помощью в ПИРС УО «ПГУ», имеющий необходимый и достаточный опыт работ в разработке проектных решений по усилению подобного рода сооружений.

Обследуемый постамент блока теплообменников установки АВТ-2 находился в зоне активного воздействия пожара в течение 2...2,5 часов. За это время при температуре, превышающей 500 °С (данный факт подтверждают оплавленные лопасти вентиляторов АВО, изготовленные из алюминия), конструкции ригелей и плит перекрытия в осях 1-6/А-В включительно получили значительные повреждения (рис. 2), о чем свидетельствовало изменение цвета от серого до темно-желтого, а также сколы защитного слоя бетона по нижним граням ребер плит и ригелей, сопровождающиеся оголением и провисанием одного и более стержней рабочей арматуры, нарушением её сцепления по всей длине конструкций (в том числе и зонах анкеровки) с бетоном, фактическая прочность которого на глубину до 50 мм была приближена к нулю [2].



Рис. 2. Внешний вид поврежденного пожаром постамента теплообменников технологической установки АВТ-2 ОАО «Нафтан»

Дальнейшее использование конструкций сооружения без их предварительного усиления, а тем более нахождение людей в прилегающей зоне, было недопустимо. Отметим, что существующая расчетная схема сооружения затрудняла использование традиционных методов восстановления конструкций, а тем более подтверждение принятых проектных решений по их усилению имеющимся потенциалом строительной нормативной базы.

На данном этапе было принято решение по использованию научно обоснованной и экспериментально проверенной методики расчета прочности и жесткости усиленных созданием неразрезности железобетонных конструкций, учитывающей напряженно-деформированное состояние конструкции до усиления.

Предлагаемая методика расчета основана на использовании метода конечных элементов в сочетании с деформационной моделью сечений.

Железобетонные конструкции на каждом этапе расчета представляются совокупностью стержневых конечных элементов, имеющих ступенчато-переменную жесткость по длине конструкции.

Для определения фактических внутренних усилий в конструкциях с учетом ее особенностей работы до и после усиления разработана программа «Support» (рис. 3), которая для определения жесткостных характеристик сечений применяет ранее разработанную в УО «ПГУ» программу «Бета» [3].

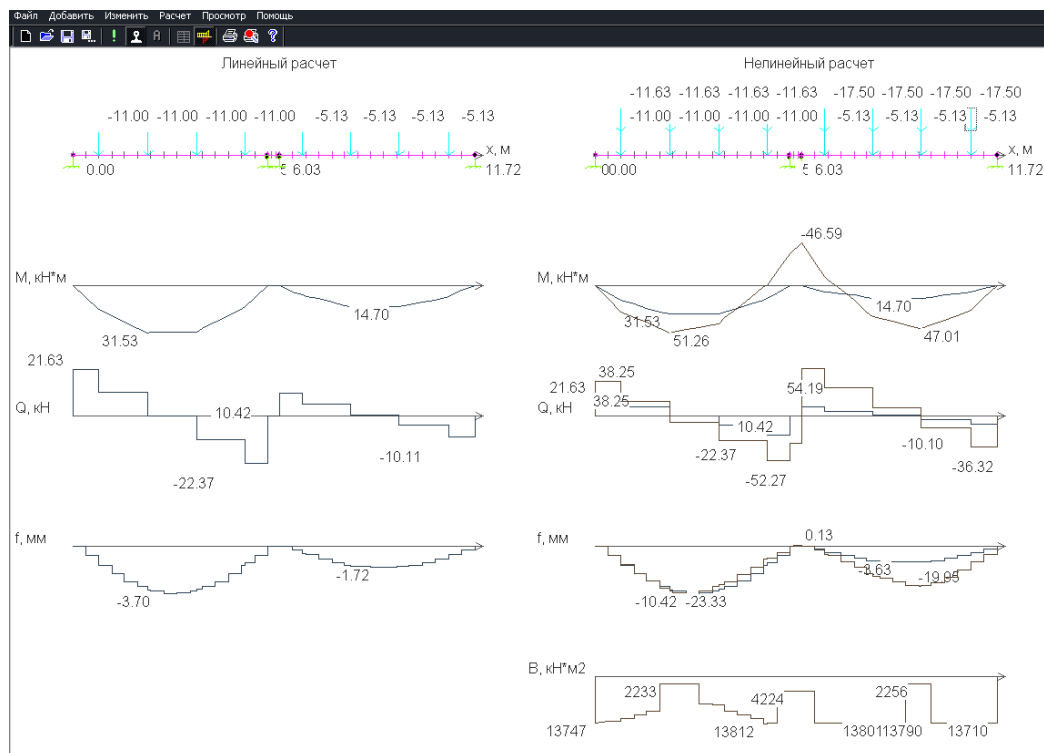


Рис. 3. Эпюры внутренних усилий, перемещений и жесткости усиленной конструкции

Для учета предварительного напряжения арматуры, а также напряженно-деформированного состояния конструкции до усиления использован подход, основанный на фиксации остаточных деформаций каждого слоя от предыдущих нагружений.

Изгибная жесткость усиленного элемента определяется суммированием жесткостей каждого элементарного слоя основного и дополнительного сечения, найденных относительно центра приведенного сечения.

С целью получения цементных растворов, улучшающих показатели кирпичной кладки, разработана комплексная добавка для цементных кладочных растворов. Исходным компонентом добавки является шлам водоочистки, который образуется в процессе устранения жесткости воды на тепловых электроцентралях.

Проведены испытания по определению прочности сцепления растворов с кирпичом. Для цементно-известкового раствора прочность сцепления составила 0,12 МПа, для раствора с добавкой на основе шлама водоочистки – 0,19 МПа.

Таким образом, прочность сцепления раствора с комплексной добавкой на 35 % выше, чем у раствора с добавкой извести. Кроме того, при испытании образцов на цементно-известковом растворе разрушение происходило по границе контакта раствора с кирпичом, а в образцах на растворе с новой добавкой разрушение происходило по растворному шву, что также указывает на более высокую адгезионную способность раствора с комплексной добавкой (рис. 4, 5). Таким образом, применение раствора с комплексной добавкой позволяет повысить монолитность кладки.

При исследовании прочности и относительных деформаций каменной кладки на растворе с комплексной добавкой испытания проводили на кирпичных столбах. В качестве контрольных приняты столбы на цементно-известковом растворе. В результате испытаний установлено, что столбы, изготовленные на растворах со сравниваемыми добавками, имеют практически одинаковую разрушающую нагрузку, равную предельной прочности на сжатие применяемого керамического кирпича (16,2 МПа).



Рис. 4. Разрушение образца на цементно-известковом растворе



Рис. 5. Разрушение образца на цементном растворе с комплексной добавкой

Испытания показали, что при одинаковых напряжениях относительные деформации столбов на цементном растворе с комплексной добавкой ниже, чем у столбов на цементно-известковом растворе.

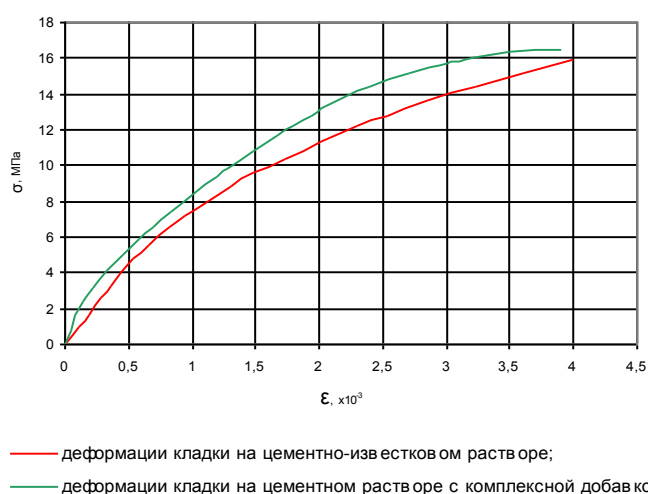


Рис. 6. Изменение относительных деформаций кирпичных столбов

Так, при максимальной нагрузке для столбов на цементно-известковом растворе относительные деформации достигли $3,99 \cdot 10^{-3}$, а для столбов на цементном растворе с комплексной добавкой – $2,96 \cdot 10^{-3}$ (рис. 6). А это на 25 % меньше показателя контрольных столбов.

Более низкие относительные деформации столбов на цементном растворе с комплексной добавкой обусловлены более низкими относительными деформациями самого цементного раствора с разработанной добавкой по сравнению с цементно-известковым раствором.

Для подтверждения этого дополнительно были изготовлены призмы размерами $70 \times 70 \times 280$ мм из цементно-известкового и цементного раствора с комплексной добавкой. По стандартной методике призмы нагружались и изме-

рялись относительные деформации. При максимальном напряжении для цементно-известкового раствора (7,53 МПа) деформации достигли $1,53 \cdot 10^{-3}$, а для цементного раствора с добавкой на основе шлама – $1,09 \cdot 10^{-3}$. Таким образом, деформации цементно-известкового раствора превысили показатели цементного раствора с комплексной добавкой на 29 %.

Определены модули упругости для растворов по ГОСТ 24452. Так, для цементно-известкового раствора модуль упругости E_b составил $11,9 \cdot 10^3$ МПа, а для цементного с комплексной добавкой – $16,4 \cdot 10^3$ МПа. Выполненные исследования позволяют сделать вывод о возможности обеспечить при использовании добавки на основе шлама комплекса технологических и эксплуатационных свойств кладочных растворов смесей и растворов, а также улучшить показатели самой кладки. При этом следует отметить, что расход новой добавки в 2,5...3 раза меньше количества необходимой извести. Экономические расчеты показывают, что стоимость новой добавки в пересчете на 1 м^3 раствора в 2,5...3 раза меньше стоимости извести.

Необходимо отметить, что производство добавки на основе шлама и растворов с ее использованием возможно во всех регионах Республики Беларусь. При переходе на использование новой добавки не требуется переоборудования растворяющих узлов.

Результаты научных исследований реализованы при разработке технических условий и при получении патента на изобретение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гучкин И.С. Диагностика повреждений и эксплуатационных качеств конструкций. – М.: АСВ, 2000. – 176 с.
2. Рекомендации по обследованию зданий и сооружений, поврежденных пожаром. – М.: Стройиздат, 1987. – 75 с.
3. Лазовский Д.Н., Глухов Д.О. Программа расчета напряженно-деформированного состояния в нормальном сечении железобетонных элементов // Новые конкурентоспособные и прогрессивные тех-

нологии, машины и механизмы в условиях современного рынка: Материалы междунар. науч. конф. – Могилев: ММИ, 2000. – 300 с.