Http://www.engstroy.spb.ru – полнотекстовая версия журнала в сети Интернет. Бесплатный доступ, обновление с каждым новым выпуском.

Инженерно-строительный журнал
научно-прикладное издание

ISSN 2071-4726

Свидетельство о государственной регистрации: ПИ №ФС77-38070, выдано Роскомнадзором

Специализированный научный журнал

Включен в Перечень ведущих периодических изданий ВАК РФ

Периодичность: 8 раз в год

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Адрес редакции:

195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, Гидрокорпус-2, ауд. 204

Главный редактор:

Вера Михайловна Якубсон

Научный редактор:

Николай Иванович Ватин

Литературный редактор:

Александра Дмитриевна Федорак

Редакционная коллегия:

д.т.н., проф., ректор ГОУ СГАСУ М.И. Бальзанников;
к.т.н., проф., проректор по перспективным проектам ФГБОУ ВПО СПбГПУ А.И. Боровков;
д.т.н., проф., декан факультета ГОУ ПГУАС О.В. Тараканов;
д.т.н., проф., зав. каф. ГОУ СПбГПУ В.В. Лалин;
к.т.н., директор РУП «Институт БелНИИС» М.Ф. Марковский;
д.т.н., проф., зав. каф. ГОУ СПбГПУ Б.Е. Мельников;
и другие.

Полный список редсовета и редколлегии – на веб-сайте журнала.

Установочный тираж 1000 экз.

Тел.: +7(812) 297-59-49

E-mail: engstroy@inbox.ru

Содержание

СОБЫТИЯ

Проблемы обследования зданий и сооружений и пути их решения 2

МЕТОДЫ

Орлович Р.Б., Деркач В.Н. Оценка прочности кладочных растворов при обследовании каменных зданий 3

Курлапов Д.В., Хомич В.М., Леванов А.В. Метод удельных энергий для определения механических свойств строительных сталей 11

Пузанов А.В., Улыбин А.В. Методы обследования коррозионного состояния арматуры железобетонных конструкций 18

ОПЫТ

Штенгель В.Г., Недялков В.С. Тепловизионное обследование железобетонных плит крепления откосов грунтовых гидротехнических сооружений 26

Савин С.Н., Демишин С.В., Ситников И.В. Мониторинг уникальных объектов с использованием динамических параметров по ГОСТ Р 53778-2010 33

Землянский А.А., Вертынский О.С. Опыт выявления дефектов и трещин в крупноразмерных резервуарах для хранения углеводородов 40

АНАЛИЗ

Соколов В.А. Оценка технического состояния строительных конструкций зданий на основе многоуровневого вероятностного анализа 45

Солдатенко Т.Н. Модель идентификации и прогноза дефектов строительной конструкции на основе результатов ее обследования 52

Ульшин А.Н. Обобщенный показатель качества стальных конструкций 62

ТЕХНОЛОГИЯ

Булатов Г.Я., Колосова Н.Б. Критерии выбора вибропогружателей 71

ОРГАНИЗАЦИЯ

Морозова Т.Ф., Хэ Тяньфу, Петрова Е.М. Сокращение площади строительной площадки за счет оптимизации графиков движения рабочих 76

Болотин С.А., Дадар А.Х., Птухина И.С. Имитация календарного планирования в программах информационного моделирования зданий и регрессионная детализация норм продолжительностей строительства 82

Калюжнюк М.М., Калюжнюк А.В. Упорядочение рабочих операций простых технологических процессов в строительстве 87

© ФГБОУ ВПО СПбГПУ

На обложке: авторские иллюстрации к статьям номера

Проблемы обследования зданий и сооружений и пути их решения

14 октября 2011 г. в ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет прошла II Научно-практическая конференция «Проблемы обследования зданий и сооружений и пути их решения». Конференция, зародившаяся только в прошлом году, собрала на этот раз ведущих специалистов в области обследования из разных городов России, а также из ближнего зарубежья. В качестве слушателей в мероприятии приняли участие более 100 человек.

Год назад в нашем журнале освещалась предыдущая конференция (Проблемы обследования зданий и сооружений // Инженерно-строительный журнал. 2010. №7(17). С. 2). Многие докладчики прошлого года снова приняли участие в мероприятии. Так, Вячеслав Гедалиевич Штенгель, к.т.н., ведущий научный сотрудник ОАО «ВНИИГ им. Веденеева», в прошлом году посвятил свой доклад анализу различных методов обследования неметаллических конструкций (статью В.Г. Штенгеля на эту тему см. в №7(17) нашего журнала, с. 4-9). На этот раз в своем совместном докладе с Василием Сергеевичем Недялковым, техником ОАО «ВНИИГ им. Веденеева», он рассказывал о конкретном методе неразрушающего контроля – тепловизионном – и личном опыте его применения. Целью обследования было обнаружение полостей между облицовкой бетонной плотины и непосредственно плитой. Метод основан на том, что нагревание и остывание облицовки в местах над полостями будет проходить по-другому, чем в местах их отсутствия. Для проверки эффективности метода места, определенные тепловизором, затем простукивались кувалдой. Подробное описание обследования и анализ результатов см. на стр. 26.

Специализация Валерия Николаевича Деркача, к.т.н., докторанта ФГБОУ ВПО СПбГПУ, – каменные конструкции. Его доклад на прошедшей конференции (см. также статью на стр. 3) был посвящен определению прочности кладочных растворов. Этот параметр необходим для определения прочности каменной кладки как по Еврокоду 6, так и по отечественным нормам, использующим формулу Л.И. Онищика. По мнению В.Н. Деркача, наиболее эффективным методом является испытание цилиндров, выбуренных из кладки, включающих два сегмента кирпича и раствор между ними. Это позволяет избежать многих проблем, возникающих при использовании других методов, требующих извлечения раствора: зачастую в старых зданиях раствор уже слишком деградировал либо имеет очень сильное сцепление с камнем и т.п.

Были на второй конференции и новые докладчики, и новые тематики. Так, доцент ГОУ ВПО Саратовский государственный технический университет Олег Станиславович Вертынский посвятил свой доклад методам обследования крупноразмерных резервуаров для хранения углеводородов. Особенностью мониторинга таких объектов является то, что опорожнять их для проведения диагностики нельзя, а традиционные методы для наполненных резервуаров показывают свою неэффективность. Поэтому авторами доклада, а также статьи на стр. 40, была предложена конструкция ультразвукового трещиномера. Он основан на акустических датчиках, работающих в режиме эхолокации. Положение датчиков зависит от вида трещины. Чтобы определить опасные зоны, в которых нужно будет использовать трещиномер, сначала применяют магнитоупругий датчик.

Доклад Надежды Валерьевны Молодцовой, руководителя технической службы СЗФО Корпорация «ТехноНИКОЛЬ», был посвящен опыту обследования кровель. Она выделила основные причины возникновения дефектов кровли и, соответственно, протечек:

- неправильное выполнение примыкания кровельного полотна к вертикальным поверхностям;
- неправильное выполнение примыкания к свесу, например, создано ограничение для стекания воды;
- неправильное выполнение примыкания к воронке внутреннего водостока;
- нарушение или отсутствие уклона кровли;
- нарушение температурно-влажностного режима – отсутствие вентиляции чердака и изоляции труб на чердаке.

Статьи по материалам большинства докладов конференции опубликованы в данном выпуске журнала.

В.М. Якубсон

Оценка прочности кладочных растворов при обследовании каменных зданий

Д.т.н., профессор Р.Б. Орлович*,
Западно-Померанский технологический университет;
К.т.н., докторант В.Н. Деркач**,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: каменная кладка; кладочный раствор; прочность при сжатии и срезе

Получение достоверных механических характеристик каменной кладки, как композиционного материала, состоящего из кладочных элементов и раствора, является одной из главных задач, которую необходимо решить при обследовании каменных зданий. Проблема заключается в различии прочностных и деформационных характеристик растворов и кладочных элементов, применяемых в разные периоды возведения зданий. Каменная кладка старых зданий выполнялась главным образом из керамического кирпича на известковом или глиняном растворе. В настоящее время нет универсальной и достоверной методики по определению физико-механических характеристик таких растворов. Как следствие, статистические данные по испытаниям материалов старых кладок, в частности растворов, практически отсутствуют. Оценка прочности растворов в старых кладках является достаточно сложной и в настоящее время не решенной в полной мере задачей.

При обследовании каменных зданий и разработке проектов по их реконструкции или модернизации прочность каменной кладки определяется в соответствии с действующими нормативными документами на основании прочностных показателей кладочных элементов и раствора, установленных по стандартным методикам. Прочность кладочного раствора определяется, как правило, неразрушающими методами или испытаниями образцов, отобранных непосредственно из тела каменной кладки. Форма, метод отбора и испытаний образцов могут быть различными, однако при этом необходимо знать поправочные коэффициенты между прочностью кладочных растворов, определенных по используемым методикам, и прочностью, полученной на основании стандартных испытаний. Кроме этого во внимание следует принимать и другие факторы, влияющие на прочность кладочного раствора в процессе его длительной эксплуатации (выветривание, химическая коррозия и т.д.).

Нормативные требования к определению прочности каменной кладки

В соответствии с действующими нормами [1, 2] прочность каменной кладки можно установить на основании результатов испытаний ее отдельных составляющих (кладочных элементов и раствора).

В Еврокоде 6 [1] нормативное сопротивление сжатию каменной кладки на растворе общего назначения определяют по формуле (1):

$$f_k = K \cdot f_b^{0.7} \cdot f_m^{0.3}, \qquad (1)$$

где f_k – нормативное сопротивление сжатию каменной кладки в Н/мм^2;
K – константа, зависящая от вида кладочного элемента (для полнотелого керамического кирпича $K=0.5$);
f_b – приведенное (нормализованное) сопротивление сжатию камня (блока) в направлении нагрузки в Н/мм^2, определяемое согласно [3];
f_m – прочность кладочного раствора при сжатии в Н/мм^2 согласно [4].

Формула (1) получена на основании анализа результатов исследований по большому количеству образцов каменной кладки, подготовка и испытание которых выполнялись в соответствии с требованиями [5]. Основным недостатком формулы (1) является нестабильность константы *K,* связывающей нормативное сопротивление каменной кладки со средними значениями прочностных показателей камней и раствора.

В отечественных нормах [2] прочность кладки при сжатии определяется по эмпирической зависимости (2), предложенной Л.И. Онищиком, для различных сочетаний прочностных характеристик кладочных элементов и раствора:

$$R_u = AR_1\left(1 - \frac{a}{b + R_2/2R_1}\right)\gamma\,, \qquad (2)$$

где R_u, R_1, R_2 – пределы прочности при сжатии в МПа кладки, кладочного элемента, раствора соответственно;
γ – поправочный коэффициент, который определяется по формуле (3), если $R_2<0.04R_1$:

$$\gamma = \frac{0.03 + 2.25\,R_2/R_1}{0.04 + 2\,R_2/R_1}\,. \qquad (3)$$

В случае, когда $R_2 \geq 0.04R_1$, $\gamma=1$;
A – конструктивный коэффициент, зависящий от вида кладочного элемента и определяемый из выражения (4):

$$A = \frac{100 + R_1}{100m + nR_1}\,. \qquad (4)$$

Если прочность кладочного элемента меньше установленной в стандарте, то A определяется по формуле (5):

$$A = \frac{1.2}{1 + R_1/3R_{ub}}\,, \qquad (5)$$

где R_{ub} – предел прочности кладочного элемента при изгибе в МПа;
a, b, m, n – эмпирические коэффициенты, зависящие от вида кладки.

Пределы прочности камня при сжатии и изгибе определяются в соответствии с требованиями [6].

В формулах (1), (2) прочность кладочного раствора устанавливается на основании испытаний образцов, представляющих собой половины стандартных растворных балочек размерами 40×40×160мм. Очевидно, что данная методика неприемлема в случае определения прочности кладочного раствора в существующих зданиях. Для этих целей применяются неразрушающие методы или методы, основанные на испытаниях образцов раствора, отобранных непосредственно из тела кладки.

Методы оценки прочности растворных швов каменной кладки при сжатии

Отбор проб раствора из тела каменной кладки для последующих их испытаний очень трудоемок. Поэтому при определении прочности кладочного раствора в существующих конструкциях часто применяются приборы неразрушающего контроля, принцип действия которых основан на методе ударного импульса. В частности, для определения прочности раствора используется измеритель прочности бетона ИПС-МГ4.01 с энергией удара 0.16 Нм или тестовый молоток Шмидта с энергией удара 0.833Нм [7]. В зависимости от вида испытуемых материалов молотки снабжаются соответствующими шкалами измерений и специальными плунжерами. Для этих же целей применяются специальные устройства, принцип действия которых основан на вбивании в растворный шов стального острия с определенной энергией удара. Мерой прочности раствора при сжатии является глубина погружения острия в раствор с поправкой на величину сжимающих напряжений в растворном шве. Кроме того, для оценки прочности раствора может использоваться ультразвуковой метод или метод, основанный на измерении энергии при сверлении растворного шва [8].

Следует отметить, что вышеприведенные методики позволяют получить скорее качественные, чем количественные показатели прочности растворных швов. Недостатком данных методик является еще и то, что ими оцениваются прочностные показатели поверхностного слоя раствора, который в наибольшей степени подвержен деградации, при этом по толщине конструкции прочность раствора может существенно разниться.

При возведении каменных конструкций старых зданий основным вяжущим кладочных растворов была известь, иногда гипс или глина, а во второй половине XIX века цемент. Анализ химического состава растворов позволяет определить их составляющие, на основе которых можно изготовить стандартные образцы раствора и выполнить их испытание по определению прочности при изгибе и сжатии. При этом необходимо иметь в виду, что полученные результаты могут значительно отличаться от истинных значений прочности по следующим причинам:

- при твердении образцов раствора приготовленных на основе химического состава старых растворов не учитывается технологии выполнения последних, количество воды, применяемые добавки, атмосферные воздействия во время выполнения каменной кладки, реологические явления;
- на прочность растворов большое влияние оказывает их деградация вызванная выветриванием, химической коррозией, засолением и другими факторами, имеющими место при длительной эксплуатации каменной кладки.

В технической литературе содержится много различных предложений, касающихся методов лабораторных испытаний образцов растворов, отобранных из швов кладки. В соответствии с [9] испытываемые образцы готовятся из двух пластинок кладочного раствора квадратной формы, склеенных между собой и выровненных по контактным поверхностям гипсовым раствором (рис. 1).

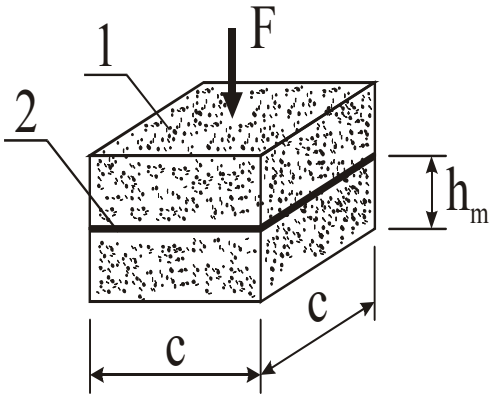


Рисунок 1. Схема испытания раствора, отобранного из горизонтальных швов, толщиной h_m согласно [9]: 1 – раствор, 2 – соединительный шов

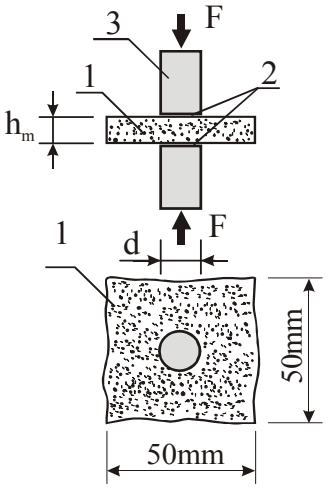


Рисунок 2. Схема испытания раствора, отобранного из горизонтальных швов, толщиной h_m согласно [10]: 1 – раствор, 2 – войлок или гипс, 3 – стальной стержень Ø 20-25мм

Механические свойства соединительного шва должны быть близки к свойствам испытываемого раствора. В соответствии с данным методом испытаний прочность раствора при сжатии определяется по формуле (6).

$$f_m = k_m \frac{F}{A}, \qquad (6)$$

где F – разрушающая нагрузка;
$A=c\times c$ – поперечное сечение;
k_m – коэффициент корреляции между прочностью испытанных образцов и прочностью стандартных образцов (половин балочек размерами 40×40×160мм). Коэффициенты кореляции в зависимости от размеров образцов-кубов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициент корреляции k_m для определения прочности раствора

Вид раствора	Размер ребра куба (см)		
	2	3	4
Летний	0,56	0,68	0,80
Зимний	0,46	0,65	0,75

На рис. 2 показана схема испытаний кладочного раствора согласно требованиям стандарта DIN 18555-9:1999 [10]. Прочность раствора определяется по формуле (3), в которой A – поперечное сечение стального стержня. Кроме масштабного фактора, на прочность раствора в

данном случае оказывает влияние эффект Баушингера, так как сжимаемый между стальными стержнями раствор работает вместе с остальной незагруженной областью образца. Коэффициент корреляции k_m для данного вида испытаний ориентировочно принимается равным 0.4-0.5.

Подобная методика испытаний была приведена в СН 290-64 и названа «методом инженера Сенюты» [11]. В соответствии с данной методикой из отобранного раствора готовят образцы в виде квадратных пластинок, сторона которых превышает толщину пластинки примерно в 1.5 раза. Нагрузка на образец передается через 30-40 мм металлический стержень, установленный по центру пластинки. Сторона основания или диаметр стержня должны быть примерно равны толщине растворного шва. Прочность раствора при сжатии определяется делением разрушающей нагрузки на площадь поперечного сечения стержня. Для перехода к прочности стандартных образцов результаты испытаний пластинок умножают на коэффициент корреляции 0.5.

Образцы раствора могут также иметь форму цилиндров, изготовленных из высверленных из раствора 3-4 круглых пластин диаметром 50-60мм и склеенных между собой гипсовым раствором (рис. 3).

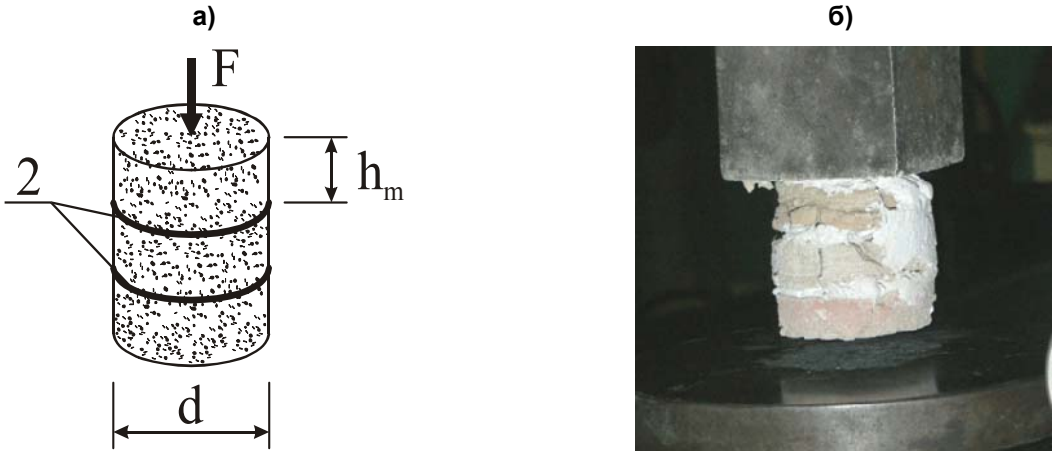


Рисунок 3. Схема (а) и общий вид (б) испытания образцов, изготовленных из круглых пластин раствора толщиной h_m: 1 – раствор, 2 – соединительный шов

Необходимо отметить, что объем приготовленных таким образом образцов близок к объему стандартных образцов раствора (половин балочек размерами 40×40×160мм).

Недостатком вышеперечисленных методов испытаний является сложность отбора образцов раствора и изготовление опытных образцов-цилиндров. Касается это, в первую очередь, слабых известковых растворов прочностью ниже 1.0 МПа или растворов, имеющих хорошее сцепление с камнем. В этом случае может быть использована предлагаемая авторами настоящей статьи и запатентованная за рубежом методика испытаний кладочного раствора на образцах цилиндрической формы, отобранных из тела каменной кладки. Образец выбуривается перпендикулярно плоскости кладки таким образом, что бы его сечение включало два сегмента кладочных элементов с растворным швом между ними. Испытание образцов проводится в жестких стальных обоймах внутренним диаметром, равным диаметру цилиндрического образца (рис. 4).

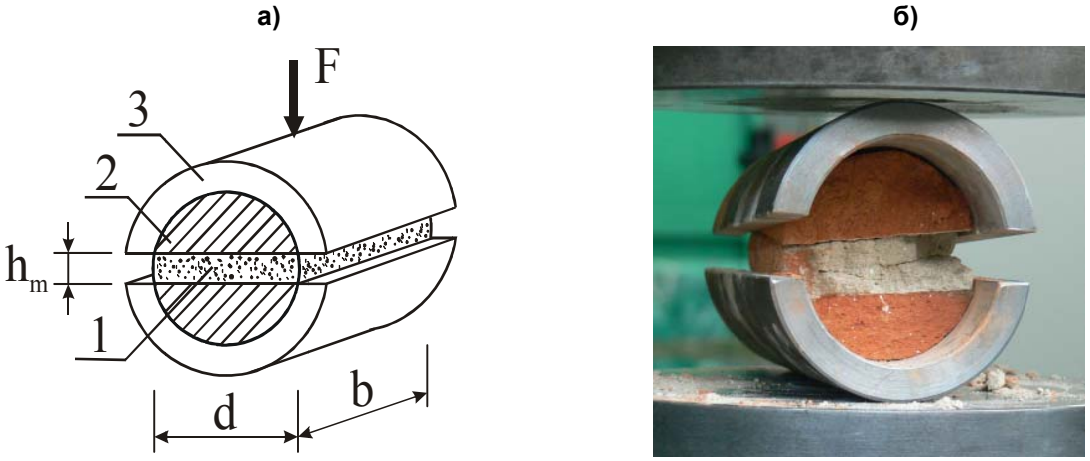


Рисунок 4. Схема (а) и общий вид (б) испытания раствора на выбуренных из кладки образцах-цилиндрах: 1 – раствор толщиной h_m, 2 – кирпич, 3 – стальная обойма

Прочность кладочного раствора при сжатии f_m определяется по формуле (6), в которой $A = d \cdot b$ (d – диаметр образца, b – его длина).

Результаты собственных исследований прочности кладочных растворов

С целью сравнения прочности кладочных растворов при сжатии, полученных по различным методикам, и определения коэффициентов корреляции для перехода к прочности стандартных образцов были выполнены исследования растворов вновь возведенной кладки и кладки стен, эксплуатировавшихся более 100 лет и подлежащих разборке.

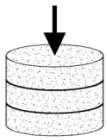
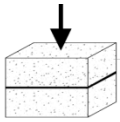
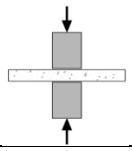
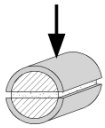
В образцах растворов, отобранных из старой кладки, определялись вид и содержание вяжущего и заполнителей, объемная плотность, массовая влажность. Было установлено, что в качестве вяжущего в растворе старых кладок использовалась гидравлическая известь, объемная плотность раствора составила около 1600 кг\м^3. Так как раствор имел малую прочность сцепления с камнями, была возможность извлечь из каменной кладки достаточно большие его фрагменты.

Впоследствии из фрагментов раствора выбуривались круги диаметром 50 мм. Часть из них была испытана на сжатие в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2. Из остальных кружков были изготовлены образцы в виде цилиндров высотой 40-50мм (рис. 3). Кроме того, из извлеченного из швов кладки раствора были изготовлены квадратные плитки с размером стороны 40 мм, из которых впоследствии готовились образцы-кубики (рис. 1). Также из кладки отбирались образцы-цилиндры диаметром 50 мм, которые включали два сегмента кирпича с растворным швом между ними (рис. 4). Отбор образцов производился без нарушения структуры раствора и его сцепления с камнями. Такие же образцы были изготовлены из раствора вновь возведенной кладки.

Указанная кладка была выполнена на цементном растворе, в состав которого входили: цемент – 25%, заполнители – 75%, добавки – 0.02%. Его прочность при сжатии, определенная по стандартной методике [4], составила 16.5 МПа.

Полученные средние значения прочности кладочного раствора при сжатии с коэффициентами вариации приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты испытаний прочности раствора, отобранного из вновь выполненной и старой (в скобках) кладок

№п\п	Метод испытаний	Количество образцов	Средняя прочность (МПа)	Коэффициент вариации %
1		**9** (12)	**17,8** (0,6)	**30** (28)
2		**25** (28)	**23,5** (0,9)	**28** (55)
3		**30** (33)	**32,6** (2,6)	**28** (103)
4		**10** (10)	**72** (2,8)	**18** (21)

Прочность кладочных растворов, определенная на образцах, показанных на рис. 1 и 2, в таблице 2 приведена без учета коэффициентов корреляции k_m.

По результатам испытаний была построена гистограмма и кривые распределения плотности прочностных показателей раствора (рис. 7). Статистическая обработка полученных результатов показала, что они подчиняются логнормальному закону распределения.

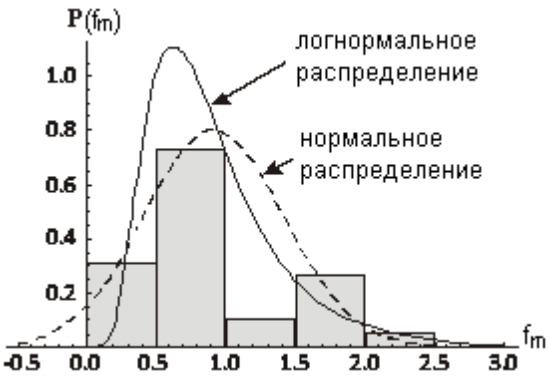


Рисунок 5. Закон распределения плотности прочности кладочного раствора

Анализ результатов испытаний, приведенных в таблице 2, показывает, что прочность кладочного раствора при сжатии, полученная на различных образцах, существенно разнится. Следует отметить, что наиболее близкие к стандартным испытаниям значения прочности раствора получены для образцов, показанных на рис. 3. Наибольшую прочность раствора показали выбуренные из кладки образцы-цилиндры (рис. 4). При испытании данных образцов растворный шов так же, как и в кладке, работает в условиях трехосного сжатия, принимая во внимание его сцепление с камнем и силы трения. При этом полученная прочность раствора при сжатии для старой и новой каменных кладок была в среднем в 4.3 раза выше, чем при испытаниях, показанных на рис. 3 (1 строка таблицы 2). Прочность раствора, определенная по образцам-кубам (рис. 1) была в среднем в 1.4 раза выше, чем прочность цилиндрических образцов, приведенных на рис. 3. Следует отметить, что данные выводы являются справедливыми для раствора, отобранного из новой и старой кладки.

Значительно большая разница в прочности растворов (относительно образцов, показанных на рис. 3) наблюдалась при испытаниях по методике DIN 18555-9 (рис. 2). В данном случае прочность цементного раствора была в 1.8, а известкового в 4.3 раза выше прочности, полученной при испытании цилиндрических образцов, при этом коэффициент вариации прочности известковых растворов был самым высоким и составил 103%. Причиной этого могло быть существенное отличие в толщине извлеченных из кладки фрагментов цементного и известкового раствора. Толщина плиток цементного раствора составляла h_m=10±1мм, а известкового 12-20мм. Кроме того, механизм разрушения цементного раствора был хрупким, а известкового – пластичным.

Оценка прочности касательного сцепления кладочных растворов и угла внутреннего трения

Важными характеристиками, определяющими прочностные и жесткостные свойства каменной кладки при сдвиге, являются ее начальное сопротивление сдвигу (касательное сцепление) и угол внутреннего трения в плоскости горизонтальных растворных швов.

При одновременном действии сдвигающих и сжимающих напряжений прочность кладки при срезе определяется по формуле Кулона-Мора (7):

$$f_v = f_{v0} + \sigma_c tgc_j, \qquad (7)$$

где f_{v0} – начальное сопротивление кладки сдвигу в плоскости растворных швов при σ_c=0;

σ_c – сжимающие напряжения, действующие перпендикулярно горизонтальным растворным швам;

c_j – угол внутреннего трения для растворного шва.

В соответствии со стандартом [12], начальное сопротивление кладки сдвигу f_{v0} и угол внутреннего трения c_j получают на основании испытаний образцов кладки, подверженных одновременному действию сжимающих и скалывающих напряжений (рис. 6). Уровень обжатия зависит от прочности кирпича при сжатии. Например, при прочности камня большей, чем 10 МПа, значения σ_c принимаются равными 0.2, 0.6, и 1.0МПа, а при прочности камня ≤10 МПа σ_c=0.1, 0.3, 0.5 МПа.

а) б)

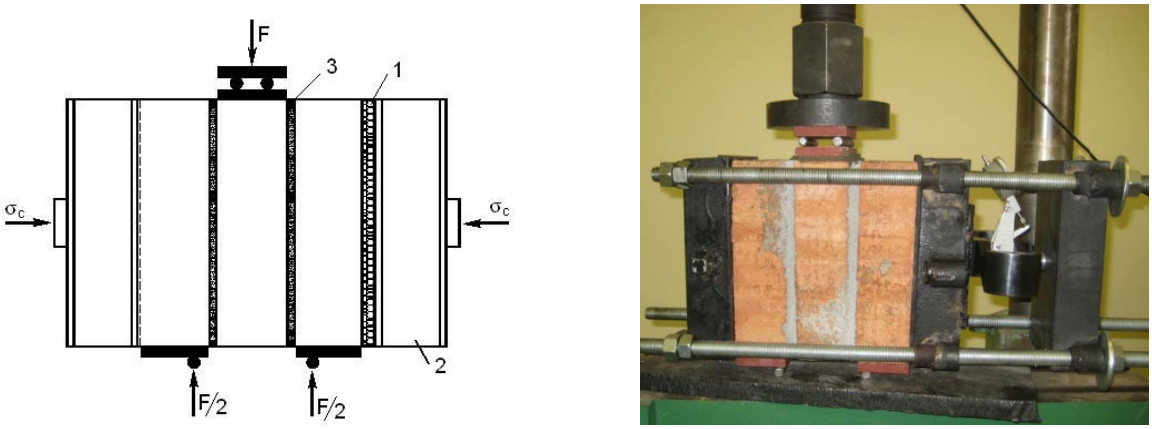


Рисунок 6. Схема (а) и общий вид (б) испытания опытного образца каменной кладки согласно [12]: 1 – резиновая прокладка, 2 – стальная траверса, 3 – растворный шов

Так как величина сжимающих напряжений σ_c является переменной, это дает возможность построения графика зависимости «$f_v - \sigma_c$» (рис. 7). Прочность на «чистый» срез f_{v0} устанавливается путем экстраполяции графика до ординаты σ_c=0.

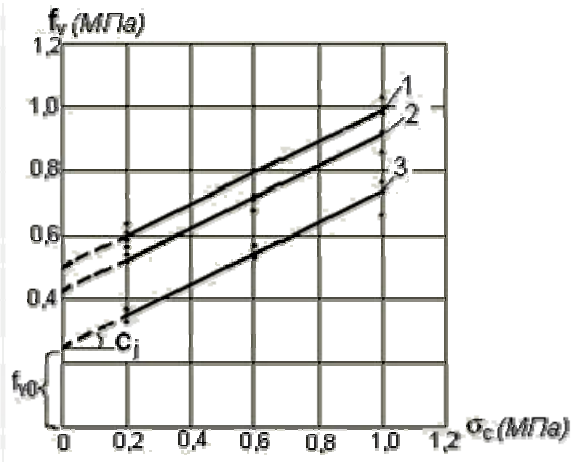


Рисунок 7. Экспериментальная зависимость «$f_v - \sigma_c$» для кладки из керамического полнотелого кирпича на цементном растворе при различной прочности раствора f_m: 1 – *10.2* МПа, 2 – *7.9* МПа, 3 – *3.2* МПа

Совершенно очевидно, что применение методики [12] для оценки прочностных характеристик кладки при сдвиге в существующих конструкциях является затруднительным. В связи с этим авторами используется разработанная ими методика, основанная на испытании цилиндрических образцов, показанных на рис. 4. Отличие данной методики от метода оценки прочности раствора при сжатии заключается в том, что плоскость горизонтальных растворных швов располагается под углом $0^o<a<90^o$ к направлению действия сжимающего усилия *F* (рис. 8).

Варьируя величину угла а, мы получаем возможность изменять значения сдвигающих и сжимающих напряжений, которые определяются по формулам (8, 9):

$$f_v = \frac{F}{d \cdot b} \cos\alpha, \qquad (8)$$

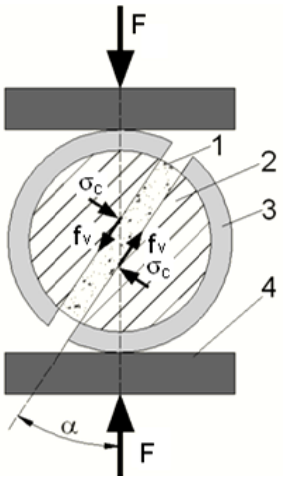


Рисунок 8. Схема испытаний образцов-цилиндров на сдвиг при действии сжимающего усилия под углом к растворному шву: 1 – растворный шов, 2 – кирпич, 3 -стальная обойма, 4 – плита пресса

$$\sigma_c = \frac{F}{d \cdot b} \sin \alpha \,, \qquad (9)$$

где *F* – разрушающая нагрузка;
d, b – соответственно диаметр и длина образца (рис. 4);
а – угол между направлением действия сжимающей нагрузки и растворным швом.

Зная величину касательных напряжений f_v при разрушающей нагрузке *F* и соответствующие ей значения сжимающих напряжений σ_c, можно построить график зависимости «$f_v - \sigma_c$», по которому определить начальное сопротивление сдвигу f_{vo} и угол внутреннего трения c_j (рис. 7).

Заключение

Среди рассмотренных методов оценки прочности кладочного раствора в существующих каменных конструкциях наиболее универсальным и информативным является метод, основанный на испытаниях, выбуренных из тела кладки образцов цилиндров. С помощью данного метода можно выполнить оценку прочностных показателей кладочных растворов не только при сжатии, но и при сдвиге, а также проанализировать степень деградации раствора по толщине каменной конструкции. Для получения коэффициентов корреляции между прочностными показателями растворов, определенными по предлагаемой методике, и прочностью стандартных образцов, в настоящее время авторами выполняются обширные исследования кладочных растворов как старых, так и вновь возводимых каменных конструкций.

Литература

1. EN 1996-1-1:2005 Eurocode 6. Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten. Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk. 127 p.
2. СНиП II-22-81* Каменные и армокаменные конструкции. М. : Стройиздат, 1983. 40 с.
3. EN 772-1:2000 Prüfvervahren für Mauersteine – Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit. 9 p.
4. EN 1015-11:1999 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel. 16 p.
5. EN 1052-1:1998 Prüfverfahren für Mauerwerk – Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit. 14 p.
6. ГОСТ 8462-85. Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе. М. : Госстрой СССР. 7 с.
7. Белов В. В., Деркач В. Н. Экспертиза и технология усиления каменных конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2010. №7. С. 14-20.
8. Jasieńko J., Engel L., Kondolewicz A. Problemy konstrukcyjno-konserwatorskie w stabilizacji i ekspozycji ruin obiektów kamiennych na przykładzie Zamku „Lenno” we Wleniu // Wiadomości Konserwatorskie. 2009. № 26. Pp. 12-18.
9. Рекомендации по обследованию и оценке технического состояния крупнопанельных и каменных зданий. М. : ЦНИИСК им.В.А.Кучеренко, 1988. 57 с.
10. DIN 18555-9:1999 Testing of mortars containing mineral binders – Part 9: Determination the compressive strength of hardened mortar. 12 p.
11. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Каменные и армокаменные конструкции / под ред. С.А. Семенцова, В.А. Камейко. М. : Стройиздат, 1968. 174 с.
12. EN 1052-3:2002 Prüfverfahren für mauerwerksbau – Teil 3: Bestimmung der anfangsscherfestigkeit. 11p.

**Роман Болеславович Орлович, г. Щецин, Польша*

Тел. раб.: +48-661-868850; эл. почта: orlowicz@mail.ru

***Валерий Николаевич Деркач, г. Брест, Беларусь*

Тел. раб.: +375-296-411962, эл. почта: v-derkatch@yandex.ru

Метод удельных энергий для определения механических свойств строительных сталей

К.т.н., доцент Д.В. Курлапов;
к.т.н., профессор В.М. Хомич;
адъюнкт А.В. Леванов*,
Военный инженерно-технический институт (филиал)
ФГВОУ ВПО «Военная академия тыла и транспорта им. генерала армии Хрулева А.В.»

Ключевые слова: предел текучести строительной стали; метод; удельная энергия; устройство

Оценка технического состояния, а также изыскание резервов несущей способности сохраняемых стальных конструкций позволяет экономить определенную долю средств, выделяемых на реконструкцию и усиление объектов капитального строительства. Несущая способность стальных конструкций определяется несущей способностью элементов и несущей способностью узлов, соединений и сопряжений. Несущая способность элементов в основном определяется прочностными свойствами стали и геометрическими характеристиками сечения.

В настоящей работе рассматриваются вопросы определения прочностных свойств стали конструктивных элементов, а именно предела текучести и временного сопротивления (далее по тексту механические свойства) существующих стальных конструкций.

Основной характеристикой сопротивления материала силовым воздействиям является нормативное сопротивление R_n. Нормативные сопротивления устанавливаются на основе статистической обработки данных по испытаниям образцов. Для металлических конструкций приняты два вида нормативных сопротивлений: R_{yn}, устанавливаемое по пределу текучести σ_y, и R_{un}, устанавливаемое по временному сопротивлению σ_u.

Нормируемые в руководящих документах значения предела текучести σ_y и временного сопротивления σ_u являются браковочными минимумами этих величин. При этом отбор образцов осуществляется так, чтобы обеспеченность браковочного минимума была не менее 0,95 (ГОСТ 27772-88*). Например, для предела текучести стали ВСт3пс6, гистограмма распределения и плотность вероятности которого приведены на рис. 1, браковочный минимум установлен σ_y=235 *МПа* в соответствии с требованиями СНиП II-23-81*.

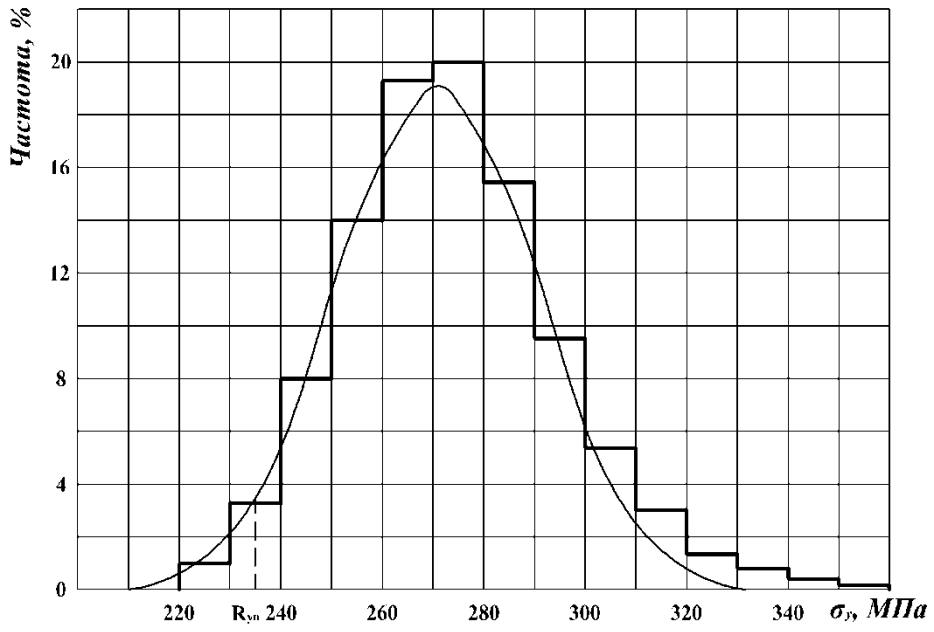


Рисунок 1. Гистограмма распределения и плотность вероятности предела текучести стали ВСт3пс6

Площадь под кривой плотности вероятности справа от абсциссы σ_y=235 МПа равна 0,95. Анализируя гистограмму, представленную на рис. 1, можно сделать вывод, что конструктивные элементы существующих стальных конструкций обладают запасом прочности, учесть влияние которого при расчете этих конструкций не представлялось возможным [1-6]. Превышение фактических значений механических свойств материала элементов в эксплуатируемых стальных конструкциях над их расчетными характеристиками составляет, по разным источникам, 10-20%.

Методика определения механических свойств стали для элементов в существующих стальных конструкциях предусматривает испытания вырезанных образцов, изготовленных в соответствии с требованиями руководящих документов (ГОСТ 1497-84) путем их статического растяжения на разрывной машине. Механические свойства материала, полученные с помощью статического растяжения образцов, довольно точны, их достоверность обычно не ниже 0,95.

Однако следует заметить, что:

- процесс изготовления образцов весьма трудоемок;
- для некоторых элементов вырезание образцов невозможно или связано с определенными затруднениями, например в элементах, определяющих несущую способность конструкции в целом;
- ослабленное место элемента при вырезании образца может требовать усиления накладками или другим способом;
- для испытания образцов требуются специальные разрывные машины и другие приборы, которые не всегда доступны, особенно в отдаленных районах.

В связи с перечисленными недостатками интерес представляют косвенные способы определения механических свойств материала элементов в существующих стальных конструкциях, которые позволяли бы проводить измерения в необходимом объеме без непосредственного вырезания образцов.

Таких способов, позволяющих достаточно точно определять механические свойства стали, довольно много, однако все они имеют определенные недостатки, подробно рассмотренные в [7].

В данной работе предлагается к рассмотрению метод определения фактических значений механических свойств стали в существующих конструкциях.

Предлагаемый метод основан на сравнении значений удельных энергий, затраченных на сверление каналов в эталонном образце и в элементе обследуемой стальной конструкции.

Для реализации предложенного метода необходимо иметь образец, изготовленный из строительной стали в соответствии с требованиями руководящих документов, с известными механическими свойствами, назовем его эталонным. Значения механических свойств стали эталона получают путем статического растяжения данного образца с помощью разрывной машины. При этом считается, что диаграммы напряжений при растяжении стали исследуемого конструктивного элемента и стали эталонного образца подобны по внешнему виду, что было установлено из анализа большого числа справочных материалов [8]. Площадь под кривой диаграммы растяжения является интегральным показателем и соответствует работе *A*, затрачиваемой на разрушение данного эталонного образца. Проанализировав диаграммы растяжения образцов, изготовленных из всех классов строительных сталей, представленных в нормативных документах, можно сделать вывод, что все стали проходят похожие стадии деформирования при статическом растяжении образцов с помощью разрывной машины, и что протяженность диаграммы растяжения по оси абсцисс для строительных сталей, близких по своему классу, будет примерно одинакова.

И в эталонном образце, и в исследуемом материале стальной конструкции выполняют серии сверлений, при этом считается, что предел текучести σ_y и временное сопротивление σ_u материала эталонного образца и материала исследуемого конструктивного элемента соотносятся так же, как значения удельных энергий, затраченные при сверлении в них каналов:

$$\frac{\sigma_{fact}}{\sigma_1} = \frac{W_{ufact}}{W_{u1}},$$

где σ_{fact} – предел текучести (временное сопротивление) материала исследуемого элемента стальной конструкции;
σ_1 – предел текучести (временное сопротивление) материала эталонного образца;

W_{ufact} – математическое ожидание для значений удельных энергий, затраченных при сверлении материала исследуемого элемента стальной конструкции;
W_{u1} – математическое ожидание для значений удельных энергий, затраченных при сверлении материала эталонного образца.

Соответственно, предел текучести либо временное сопротивление (в зависимости от интересующего параметра) материала исследуемых конструктивных элементов определяют по формуле:

$$\sigma_{fact} = \sigma_1 \frac{W_{ufact}}{W_{u1}}. \quad (1)$$

Сверление каналов в элементах существующих стальных конструкций сверлом малого диаметра не приведет к существенному снижению их несущей способности и позволит проводить измерения в необходимом объеме непосредственно на строительной площадке, а не в лабораторных условиях, что позволит сократить время и стоимость проводимых исследований, поэтому применение предлагаемого метода представляет практический интерес. Для получения более достоверных сведений сверление необходимо проводить в малонапряженных зонах обследуемых конструктивных элементов.

Для проверки разработанного метода были проведены экспериментальные исследования с использованием образцов, изготовленных из строительных сталей.

При проведении исследований использовали образцы толщиной 16 мм, изготовленные в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84 из сталей, часто применяемых в строительстве, а именно малоуглеродистой стали (марки ВСт3пс6) и низколегированной стали (марки 15ХСНД).

Для удобства проведения испытаний образцы разбиты на две серии: первая серия – образцы, изготовленные из стали марки ВСт3пс6; вторая серия – образцы, изготовленные из стали марки 15ХСНД.

Количество образцов для испытаний в одной серии определялось согласно работам [9,10] по формуле (1):

$$N = \left[\left(\frac{va}{p_t} \right)^2 \right] + 1, \quad (2)$$

где N – количество образцов в серии, необходимое для обеспечения заданной достоверности измерения механических свойств стали;
[ ] означает действие «выделение целой части»;
p_t – показатель точности измерений; так как испытания образцов будут проводиться в соответствии с методикой, регламентированной ГОСТ 1497-84*, показатель точности был принят равным 5%;
a – показатель достоверности измерений (при вероятности 0,95, a=1,96 [11]);
v – коэффициент вариации; так как коэффициент вариации можно найти только после проведения испытаний, при планировании эксперимента можно задаться этим коэффициентом, для металла v = 3-5%, отсюда коэффициент вариации был принят равным 5%.

При статическом растяжении исследуемых образцов определены предел текучести и временное сопротивление сталей, из которых изготовлены образцы (табл. 1).

Таблица 1. Механические свойства сталей, из которых изготовлены исследуемые образцы

№ Образца	ВСт3пс6		15ХСНД	
	σ_y, МПа	σ_u, МПа	σ_y, МПа	σ_u, МПа
1	297	405	392	542
2	294	394	386	529
3	304	397	395	518
4	308	402	388	533

Используя результаты измерений, представленные в табл. 1, вычислим математические ожидания для механических свойств исследуемых сталей:

$$M = \frac{1}{C}\sum_{c=1}^{C} B_c,$$

где B_c – вариация – величина, получаемая в результате каждого измерения;
C – число измерений,
и средние квадратические отклонения для механических свойств исследуемых сталей:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{C-1}\sum_{c=1}^{C} x_c^2},$$

где x_i – величина, характеризующая отклонение результата каждого измерения предела текучести (временного сопротивления) стали от среднего арифметического значения ($x_c = B_c - M$).

Значения математических ожиданий и средних квадратических отклонений для механических свойств сталей, из которых изготовлены исследуемые образцы, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Математические ожидания, средние квадратические отклонения и вариационные коэффициенты для механических свойств исследуемых сталей

Марка стали	Значения			
	$M\sigma_y$, МПа	$M\sigma_u$, МПа	$\sigma\sigma_y$, МПа	$\sigma\sigma_u$, МПа
ВСт3пс6	301	399	6,3	4,6
15ХСНД	390	531	4,3	9,6

Здесь $M\sigma_y(\sigma_u)$ – математическое ожидание для предела текучести (временного сопротивления) исследуемых сталей;
$\sigma\sigma_y(\sigma_u)$ – среднее квадратическое отклонение для предела текучести (временного сопротивления) исследуемых сталей, полученные при статическом (кратковременном) растяжении стальных образцов на разрывной машине.

На основе математических ожиданий и среднеквадратических отклонений были определены доверительные интервалы для механических свойств исследуемых сталей при заданной достоверности измерения 0,95.

Так как количество образцов в серии мало (N<30), доверительные интервалы для механических свойств сталей, из которых изготовлены исследуемые образцы, согласно работе [11] определялись по формуле:

$$M - t_\gamma \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}} < M < M + t_\gamma \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}}.$$

При N=4 и γ=0,95, используя распределение Стьюдента, имеем t_γ=2,78 [11]. Доверительные интервалы для механических свойств исследуемых сталей сведены в табл. 3.

Таблица 3. Доверительные интервалы для механических свойств исследуемых сталей при заданной достоверности измерения 0,95

Механические свойства стали	Доверительные интервалы, МПа	
	ВСт3пс6	15ХСНД
Предел текучести	293<M<309	384<M<396
Временное сопротивление	392<M<406	518<M<544

После построения доверительных интервалов для механических свойств исследуемых сталей необходимо проверить, попали ли полученные значения предела текучести и временного сопротивления сталей, представленные в табл. 1, в заданные границы соответствующих доверительных интервалов.

В данном случае все значения предела текучести и временного сопротивления исследуемых сталей оказались в заданных границах соответствующих доверительных интервалов, следовательно, достоверность измерения 0,95 механических свойств исследуемых сталей была обеспечена.

Для проведения экспериментальных исследований, касающихся проверки положений разработанного метода, было собрано устройство, схема которого представлена на рис. 2:

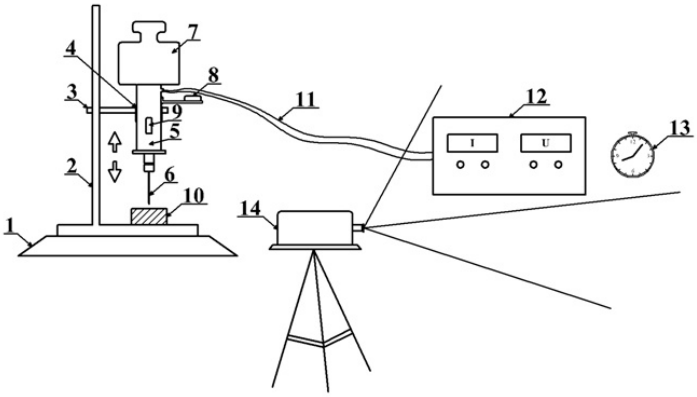


Рисунок 2. Устройство для реализации предложенного метода:
1 – стальная подставка под штатив; 2 – штатив; 3 – горизонтальная направляющая; 4 – раздвижное кольцо; 5 – электродвигатель постоянного тока; 6 – сверло малого диаметра; 7 – груз; 8 – горизонтальный уровень; 9 – вертикальный уровень; 10 – исследуемый образец; 11 – провода; 12 – блок питания постоянного тока; 13 – секундомер; 14 – видеокамера

В результате испытаний рассматриваемых серий образцов при помощи разрывной машины МР-50 были определены предел текучести и временное сопротивление для каждой из исследуемых сталей (табл. 1).

В каждом «разорванном» образце при помощи устройства, изображенного на рис. 2, сверлом малого диаметра при постоянном усилии прижима сверла к исследуемому материалу было выполнено по десять сверлений. Временные промежутки при каждом сверлении были равны 80 сек, их засекали при помощи секундомера, расстояние между просверленными каналами сверления составляло 1,5 см.

В результате проведения экспериментальных исследований были определены удельные энергии, затраченные при сверлении каждого канала в исследуемых образцах. Методика определения данных значений удельных энергий подробно изложена в [12].

Для описания предложенного метода в данной работе определен предел текучести стали ВСт3пс6. Для этого в качестве эталона использовали первый образец второй серии, изготовленный из стали 15ХСНД, а в качестве исследуемого первый образец первой серии, изготовленный из стали Вст3пс6.

При проведении экспериментальных исследований по определению предела текучести исследуемой стали при каждом сверлении в эталонном и исследуемом образцах использовали новое сверло. Полученные значения предела текучести стали ВСт3пс6 при каждом сверлении, вычисленные по формуле (1), представлены в табл. 4:

Таблица 4. Значения предела текучести стали ВСт3пс6 при каждом сверлении

Номер сверления									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Значение предела текучести стали ВСт3пс6, МПа									
272	291	285	368	271	284	293	292	293	287

После определения предела текучести исследуемой стали при каждом сверлении были определены математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение для предела текучести стали при десяти сверлениях, а также оценена пригодность полученного значения предела текучести стали для использования на практике.

С этой целью для предложенного метода при десяти сверлениях был определен доверительный интервал для предела текучести стали Вст3пс6 при заданной достоверности измерения 0,95:

$$274<M<312 \text{ МПа}.$$

На рис. 3 графически представлены доверительные интервалы для предела текучести стали ВСт3пс6, полученные для разработанного метода (нижний доверительный интервал) и для разрывной машины (верхний доверительный интервал) при заданной достоверности измерений 0,95.

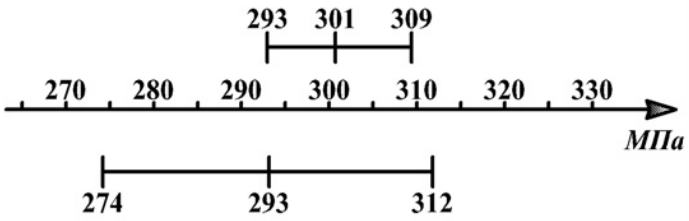


Рисунок 3. Доверительные интервалы для предела текучести стали ВСт3пс6

Более всего интересно крайнее левое значение границы доверительного интервала для предела текучести стали ВСт3пс6, полученного для разработанного метода, так как значение предела текучести стали там минимально. Согласно табл. 51,б (СНиП II-23-81*), сталь ВСт3пс6 (листовой прокат толщиной до 20 мм) соответствует стали С245. В табл. 5 произведено сравнение крайней левой границы доверительного интервала для предела текучести стали ВСт3пс6 с нормативным значением предела текучести (ГОСТ 27772-88*).

Таблица 5. Значение предела текучести для исследуемой стали

Сталь	Значение σ_y, полученное разработанным методом	Значение R_{yn}, регламентированное ГОСТ 27772-88
	σ_y, МПа	R_{yn}, МПа
С245	274	245

Анализируя данные, представленные в табл. 5, можно сделать вывод, что значение предела текучести стали, полученное при помощи предложенного метода, будет не ниже нормативного значения предела текучести этой же стали, следовательно, значением предела текучести стали, полученным при помощи разработанного метода, можно пользоваться в практических целях.

Определим, во сколько раз погрешность измерения предела текучести стали ВСт3пс6 при десяти сверлениях у разработанного метода выше погрешности измерения предела текучести стали ВСт3пс6, полученного с использованием разрывной машины.

Для этого разделим левую полуширину доверительного интервала для предела текучести стали ВСт3пс6, полученного для разработанного метода, на левую полуширину доверительного интервала для предела текучести стали ВСт3пс6, полученного для разрывной машины:

$$\varepsilon = \frac{\eta_{met}}{\eta_c},$$

где η_{met} – левая полуширина доверительного интервала предела текучести стали ВСт3пс6 при десяти сверлениях для разработанного метода (η_{met}=294-280=14 МПа);
η_c – левая полуширина доверительного интервала предела текучести стали ВСт3пс6 для разрывной машины (η_c=301-293=8 МПа);
ε – соотношение погрешностей измерений для рассматриваемых методов:

$$\varepsilon = \frac{14}{8} = 1{,}75.$$

При десяти сверлениях коэффициент вариации v для предела текучести исследуемой стали составил 9%, следовательно, необходимое количество сверлений для достижения достоверности измерения 0,95 разработанным методом согласно формуле (2) равно:

$$N = \left[\frac{1{,}96^2 \cdot 9^2}{5^2}\right] + 1 = 13 шт.$$

Из рис. 3 также видно, что значение предела текучести стали ВСт3пс6, полученное при помощи разработанного метода, сопоставимо со значением предела текучести стали ВСт3пс6, полученного при растяжении образцов, изготовленных из этой стали, на разрывной машине.

В табл. 6 проведено сравнение предела текучести стали ВСт3пс6, полученное при помощи рассматриваемых методов при заданной достоверности измерений 0,95, с нормативным значением предела текучести этой же стали согласно ГОСТ 27772-88*.

Таблица 6. Значения предела текучести для исследуемой стали

Сталь	Значение σ_y, полученное с помощью разрывной машины	Значение σ_y, полученное предложенным методом	Значение R_{yn}, по ГОСТ 27772-88
	МПа		
С245	301	293	245

Данные, представленные в табл. 6, показывают, что фактическое значение предела текучести стали в большинстве случаев выше значения, принимаемого согласно требованиям руководящих документов. В практике эксплуатации металлоконструкций известен ряд примеров, когда определение фактических значений прочностных характеристик стали позволило изыскать резервы несущей способности эксплуатируемых конструкций, и тем самым избежать дорогостоящего усиления [13].

Литература

1. Дрозд И. С. Определение механических свойств металла без разрушения. М. : Металлургия, 1965. 171 с.
2. Лимаренко В. А. Совершенствование методов определения технического состояния эксплуатируемых металлических покрытий: Автореф. Дис. … канд. техн. Наук. Киев, 1987. 19 с.
3. Логвинов Д. Н. Определение предела текучести строительной стали через характеристики твердости по результатам экспериментального исследования // Сб. тр. докторантов и адъюнктов ВИТУ 1998. СПб., 1998. Вып. 2. С. 9-12.
4. Меандров Л. В. Об экономической эффективности производства и потребления в народном хозяйстве проката, дифференцированного по группам прочности // Металлург. 1982. №6. С. 42-43.
5. Ballio G., Mazzolani F.M., Theory and design of steel structures. London, New York: *Chapman and Hall*, 2002. 427 p.
6. Mott Neville F., Jones H. The Theory of the Properties of Metals and Alloys. London, 2007. 184 p.
7. Леванов А. В. Способ определения фактических прочностных характеристик эксплуатируемых стальных конструкций и их соединений // Сб. научных статей сотрудников университета. СПб., 2009. Вып. 10. С. 47-51.
8. Беляев Н. М. Сопротивление материалов. М. : Наука, 1976. 607 с.
9. Адлер Ю. П., Макарова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. : Наука, 1976. 278 с.
10. Ашмарин И. П., Васильев Н. Н., Амбросов А. В. Быстрые методы статистической обработки и планирование экспериментов. Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1975. С. 76.
11. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М. : Высшая школа, 2003. 480 с.
12. Пухаренко Ю. В., Хомич В. М., Леванов А. В. Метод сверления для определения пределов текучести элементов строительных стальных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2011. №3. С. 17-32.
13. Колесниченко В. Г., Щурина Н. Б. Выявление резерва несущей способности металлических конструкций сооружений // Промышленное строительство. 1972. №6. С. 28-29.

**Александр Викторович Леванов, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. моб.: +79046371249; эл. почта: alex_lev83@mail.ru

Методы обследования коррозионного состояния арматуры железобетонных конструкций

Генеральный директор А.В. Пузанов,
ООО «Просек Рус»;
к.т.н., доцент А.В. Улыбин*,
ФБГОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: коррозия арматуры; обследование зданий; железобетонные конструкции; метод неразрушающего контроля

Коррозия арматуры является одним из наиболее значимых факторов, определяющих фактическое техническое состояние железобетонных конструкций, их надежность и долговечность.

Коррозионное повреждение арматурной стали приводит к следующим негативным последствиям:

- снижению сцепления арматуры с бетоном;
- образованию трещин и разрушению защитного слоя бетона, скалывающегося за счет расклинивающего действия продуктов коррозии;
- снижению несущей способности конструкций в результате уменьшения сечения арматуры и бетона (при скалывании защитного слоя);
- возможности хрупкого разрушения в случае развития питтинговой коррозии и коррозионного растрескивания высокопрочной арматуры.

В ходе натурного технического обследования железобетонных конструкций наличие коррозионного повреждения арматурных стержней определяют при помощи следующих традиционных подходов.

1. По выявлению внешних признаков, свидетельствующих о развитии коррозии (трещины в защитном слое вдоль арматуры, потеки ржавчины, отслоение защитного слоя бетона). Очевидно, что данный способ реализуем только на стадии сильного коррозионного повреждения.
2. По результатам визуального освидетельствования арматурных стержней на участках вскрытия защитного слоя. Явным недостатком данного метода является выборочность контроля и необходимость нарушения целостности конструкций.

Однако существуют и методы неразрушающего контроля (НК) коррозионного состояния арматуры, которые широко применяются в зарубежных странах (США, Евросоюз и др.) и малоизвестны в России. Об этих методах и пойдет речь в данной статье.

Метод потенциала полуэлемента

В последние годы в России начали появляться приборы для оценки коррозийного состояния арматуры в бетоне неразрушающим методом. К ним относятся Canin+ (Proceq, Швецария) и Армкор-1 (НПП «Интерприбор», Россия). Указанные приборы основаны на методе потенциала полуэлемента [1] и предназначены для измерения потенциала микрогальванической пары, который появляется в результате химической реакции между металлом арматуры и телом бетона.

Приборы, основанные на указанном методе, используются в США и Европе, где уже давно доказана экономическая целесообразность их применения, с 1970-х годов. Известно, что и в России данный метод применяется уже более 10 лет [2]. Однако отсутствие соответствующих нормативно-технических документов в нашей стране не дают методу получить известность и широкое применение. Первый и единственный документ, который регламентирует применение указанного метода и принят на территории Российской Федерации, это отраслевой дорожный методический документ ОДМ 218.3.001-2010 [1].

Для описания сущности применения указанного метода НК кратко рассмотрим основные причины коррозии арматуры в бетоне.

Общеизвестно [3,4], что основой защитного действия бетонов по отношению к арматуре является щелочной характер влаги в капиллярно-пористой структуре бетона, способствующий сохранению пассивного состояния поверхности стали. Таким образом, при высокой плотности бетона, надлежащей величине защитного слоя и отсутствии его повреждений (трещины, сколы, каверны и пр.) арматура в бетоне сохраняется в пассивном состоянии долгие годы и десятилетия.

Однако при повышенной пористости бетона и агрессивности (в том числе влажности) внешней среды бетон не обеспечивает защиту арматуры от проникновения агрессивных агентов (например, хлоридов), кислотообразующих жидкостей и газов.

Одним из основных факторов, способствующих коррозии арматуры, является нейтрализация высокощелочной среды бетона за счет обменной реакции гидроксида кальция в бетоне с кислыми газами в воздухе (в основном CO_2). Этот процесс (1) называется карбонизацией бетона:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (1)$$

Процесс карбонизации начинается с поверхности бетонной конструкции с момента ее изготовления и движется вглубь по мере проникновения углекислого газа внутрь бетона. Скорость карбонизации зависит от многих факторов, таких как плотность бетона, температура и влажность окружающей среды и самой конструкции и других. Достигая арматуры, карбонизация переводит сталь в активное состояние, а поступающие в бетон кислород (окислитель) и влага (электролит) обеспечивают процесс коррозии, проходящий по электрохимическому принципу. В основе коррозии арматуры лежит катодный процесс восстановления кислорода (рис. 1).

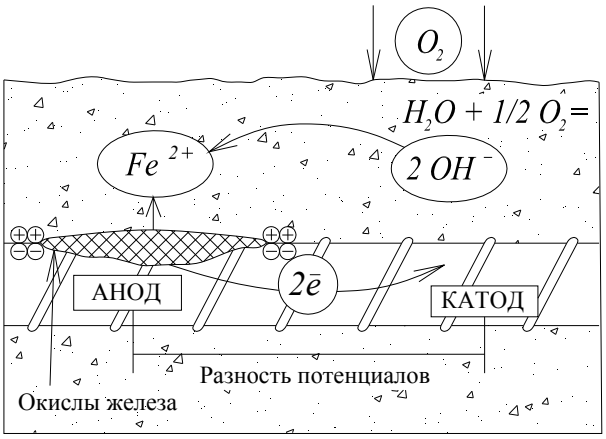


Рисунок 1. Схема электрохимической коррозии арматуры в бетоне при нарушении пассивности стали

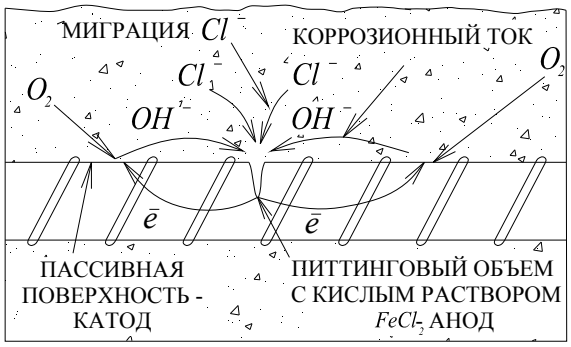


Рисунок 2. Схема электрохимической коррозии арматуры при воздействии хлоридов

На аноде ионы железа (Fe^{++}) распадаются, и электроны переходят в свободное состояние. Освободившись, они движутся к катоду, где вместе с водой и кислородом образуют гидроксид ионы (OH^-). Сущность такого процесса сводится к разрушению анодных участков и восстановлению окислителя на катодных участках поверхности металла. Коррозия арматуры при таком процессе имеет, как правило, сплошной характер. Продукты коррозии накапливаются вокруг арматуры и впоследствии приводят к образованию трещин и отслоению защитного слоя бетона [5].

Вторым возможным механизмом коррозионного разрушения арматуры является локальная депассивация арматурной стали при воздействии ионов хлора (Cl^-). Ионы хлора – сильнейшие стимуляторы коррозии стали – являются основной причиной возникновения точечной коррозии стержней арматуры [3,6] (рис. 2).

При обоих описанных механизмах возникает коррозионный ток. Потенциал коррозии – это потенциал металла, установившийся в результате протекания сопряженных анодного и катодного процессов без внешней поляризации. Измеряя потенциал арматуры, можно неразрушающим методом определить участки возникновения коррозии. Этот принцип является основой американского стандарта ASTM C876 [7] и отечественного ОДМ [1].

Однако указанный метод, так же как и традиционные, результативен в случае уже начавшейся коррозии арматуры. При этом диагностирование коррозии арматуры даже без разрушения защитного слоя бетона и на ранней стадии является решением только части проблемы. Большей проблемой является устранение последствий коррозионного повреждения или хотя бы предотвращение его дальнейшего развития.

Более актуальной проблемой является не диагностирование уже начавшейся коррозии арматуры, а определение вероятности возможности ее возникновения на более ранней стадии. Данную проблему можно решить путем контроля сохранности защитных свойств бетона по отношению к арматуре. Речь идет не о карбонизации защитного слоя и снижении щелочности, а о проницаемости защитного слоя вообще, и хлоридами в частности.

Метод удельного электрического сопротивления

Одним из методов, позволяющих контролировать проницаемость бетона без нарушения сплошности конструкций и отбора образцов, является метод измерения удельного электрического сопротивления поверхностного слоя бетона. В 1942 г. исследованиями [8] было доказано, что значение удельного электрического сопротивления пористого материала можно определить с помощью уравнения:

$$\rho = a \cdot \rho_0 \cdot \varphi^m , \qquad (2)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление водной фазы в бетоне;
a – константа, зависящая от состава материала;
m – интегральный параметр, относящийся к структуре пор в материале;
φ – доля объемного водонасыщения пор.

Зависимость (2) показывает, что чем выше объемная доля водонасыщения, тем ниже удельное электрическое сопротивление. Таким образом, удельное электрическое сопротивление указывает на связность пор и, следовательно, на сопротивление бетона к проникновению жидких или газообразных веществ. Метод измерения удельного электрического сопротивления близок по своей природе к методу диагностики наличия коррозии стержней в железобетонных конструкциях.

Существует несколько методов измерения удельного электрического сопротивления материалов: дисковый метод с одним внешним электродом, двухэлектродный метод и четырехэлектродный метод. Самым простым является метод с использованием 4 электродов, реализуемый с помощью датчика Веннера (рис. 3) [9].

а) **б)**

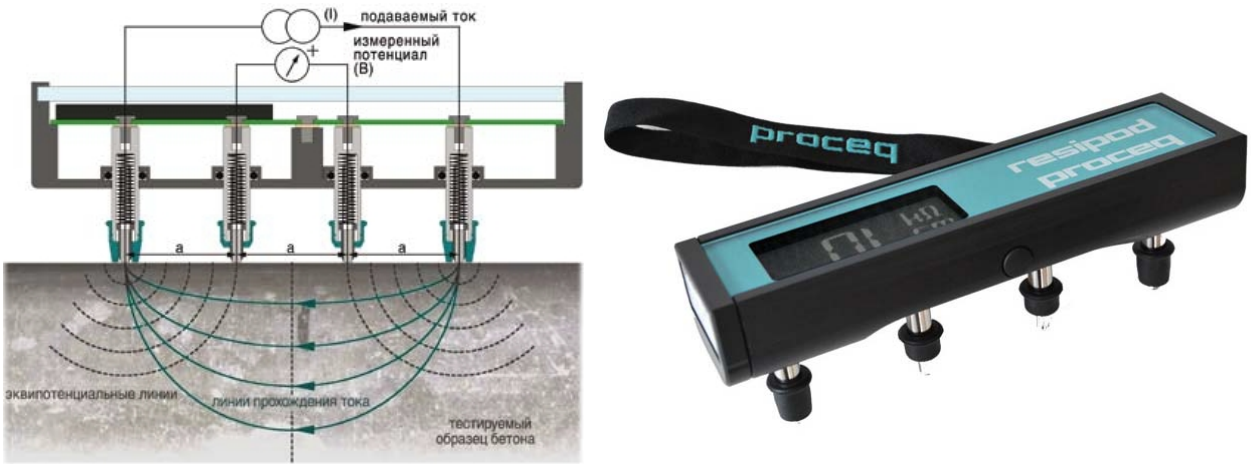


Рисунок 3. Реализация датчика Веннера в виде прибора Resipod (Proceq):
а) физическая схема измерения удельного сопротивления четырехэлектродным методом;
б) внешний вид прибора

На два внешних датчика подается ток (I), и измеряется разность потенциалов (U) между двумя внутренними датчиками. Расчетное удельное сопротивление зависит от расстояния между датчиками (a) и определяется по зависимости (3):

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot U / I . \qquad (3)$$

Помимо указанных в зависимости (3) величин, на результат измерения удельного сопротивления влияют различные *факторы* [10].

Расстояние между электродами

В бетоне ток идет через жидкость в порах в цементном камне. Зерна заполнителей преимущественно инертны. Следовательно, бетон не однородный проводник, и поток измеряемого тока также будет неоднороден. Для снижения влияния данного фактора можно увеличить расстояния между электродами, что приведет к более однородному распространению тока.

Наличие арматуры

Поскольку арматурные стержни проводят ток значительно лучше, чем бетон, то они нарушают однородное течение тока. При проведении измерений вдоль арматурных стержней при величине защитного слоя бетона 10…20 мм, измеренное сопротивление может снижаться до 2–6 раз. Даже если один из четырех электродов находится рядом с арматурным стержнем, течение тока будет далеко от идеального, а результаты – ошибочными. Если расстояние между стержнями небольшое (менее 150 мм), то измерительные электроды должны располагаться достаточно близко, чтобы исключить влияние арматуры. Это идет вразрез с необходимостью увеличения расстояния для снижения неоднородности тока из-за зерен заполнителей. Компромисс может быть найден, если расстояние между электродами будет 30-50 мм.

Карбонизация бетона

При большой глубине карбонизации защитного слоя бетона значение удельного сопротивления будет выше, чем у не карбонизированного бетона. Влияние карбонизированного слоя будет небольшим, если его глубина значительно меньше, чем расстояние между электродами.

Температура и влажность бетона

Изменение температуры бетона имеет существенное влияние на величину удельного электрического сопротивления. В целом, при повышении температуры удельное сопротивление уменьшается, и наоборот. Это результат влияния температуры на подвижность ионов и межионное взаимодействие. Зарубежные лабораторные исследования выявили, что изменение температуры на 1°С приводит к изменению удельного электрического сопротивления на величину от 3% до 5% в зависимости от влажности бетона. Сама по себе влажность бетона также оказывает влияние на величину удельного электрического сопротивления. Увеличение влажности приводит к уменьшению удельного сопротивления.

Имеющиеся за рубежом опытные данные свидетельствуют о невозможности введения однозначных критериальных значений удельного электрического сопротивления, свидетельствующих о наличии или утрате защитных свойств бетона по отношению к арматуре. Однако все лабораторные опыты показывают, что определить вероятность возникновения коррозии можно по упрощенной схеме. Суть ее проста: когда удельное электрическое сопротивление бетона мало, очень велика вероятность возникновения коррозии; когда сопротивление имеет большое значение, вероятность появления коррозии минимальна. В ходе практических экспериментов были получены пороговые значения удельного сопротивления при температуре 20°С, указанные в таблице 1.

Таблица 1. Пороговые значения удельного электрического сопротивления

Удельное электрическое сопротивление, кОм*см	Вероятность возникновения коррозии арматуры
$\rho \geq 12$	Коррозия маловероятна
$8 \geq \rho \geq 12$	Коррозия вероятна
$\rho \leq 8$	Вероятность коррозия высока

В 1987 году Лэнгфордом и Брумфилдом было предложено использование измерений удельного сопротивления с помощью 4-хэлектродного датчика Веннера для контроля скорости коррозии арматуры в бетоне [11]. Исследования, проведенные учеными в Америке, Франции, Испании, Италии и Англии, выявили, что невозможно однозначно рассчитать скорость коррозии, но можно достаточно точно определить степень вероятности ее возникновения.

Данный метод является основой разрабатываемого на сегодняшний день в США стандарта по испытаниям AASHTO «Определение сопротивления бетона проникновению ионов хлорида по удельному сопротивлению его поверхности». Данный стандарт должен стать экономически более

целесообразной альтернативой стандартам, используемым до настоящего времени: ASTM C 1556, ASTM C1202 и ASTM C642. Данная методика уже активно используется Исследовательским центром транспорта в Луизиане (Louisiana Transportation Research Center).

Практическое применение метода

Описанный метод был применен в сентябре 2011 г. при обследовании крыши здания Курского вокзала в Москве. Складчатое покрытие здания выполнено из 66 отдельных предварительно напряженных железобетонных складок и имеет плановые размеры 45 х 195 м (рис. 4). Общей целью работ по обследованию являлось определение технического состояния конструкций и выдача рекомендаций по дальнейшей эксплуатации. Одна из основных задач обследования – определение коррозионного состояния арматуры и сохранности защитных свойств бетона.

Рисунок 4. Общий вид обследуемого здания Курского вокзала

Учитывая повышенную ответственность объекта обследования и применения в складках покрытия высокопрочной канатной арматуры с низкими пластическими характеристиками, решение поставленной задачи представлялось крайне важным. В связи с большой площадью обследуемого покрытия (8775 м^2), и проведением работ без остановки эксплуатации здания, выполнить большое число вскрытий складок покрытия для визуального осмотра арматурных стержней было затруднительно. Поэтому для увеличения количества контролируемых участков было принято решение помимо вскрытий использовать неразрушающий метод контроля.

Измерения выполнялись на очищенной от окрасочных слоев и загрязнений поверхности бетона складок с помощью прибора Rezipod (см. рис. 3,б). Учет факторов, влияющих на результат измерения удельного сопротивления, выполнен следующим образом. Обеспечение однородности распределения тока обеспечивалось применением датчика с расстоянием между электродами 50 мм при крупности гранитного заполнителя в бетоне до 20 мм. Температура на период измерений составляла 17±3°С, что несколько ниже лабораторных условий (20°С), однако при данных условиях значения сопротивления не должны быть занижены.

Рисунок 5. Измерение удельного электрического сопротивления бетона стенки складки

Влажность бетона на измеряемых участках, определенная диэлькометрическим методом по ГОСТ 21718-84 «Материалы строительные. Диэлькометрический метод измерения влажности», изменялась в пределах 2…3%. Глубина карбонизованного слоя бетона не превышала 4,0 мм, что с учетом расстояния между электродами не вносит существенной погрешности в результат измерений. Перед измерениями на исследуемых участках расположение арматуры определялось магнитным методом по ГОСТ 22904-93 «Конструкции железобетонные. Магнитный метод определения толщины защитного слоя бетона и расположения арматуры», и электроды прибора располагались вне арматуры (рис. 5).

Выборочные результаты измерений на 6 складках, где были выполнены вскрытия защитного слоя бетона, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Выборочные результаты измерений на 6 складках

№ складки	Участок измерения	Состояние арматуры по результатам вскрытия	Удельное электрическое сопротивление, кОм*см
2	Стенка	Без признаков коррозии	55,0
31	Стенка	Без признаков коррозии	33,0
51	Днище	Коррозионный налет по канавке между прядями	11,0
3	Днище	Коррозионные пятна на прядях	7,0
57	Днище	Сплошная коррозия на прядях	6,0
18	Днище	Сплошная коррозия с язвами	4,5

Учитывая выявленное соответствие между значениями измеренного сопротивления, критериями, указанными в табл. 1, и фактическим состоянием арматуры, использование метода измерения удельного электрического сопротивления было признано целесообразным. Данный метод использован для неразрушающего контроля состояния арматуры на 33 участках. Вскрытие и визуальный контроль состояния арматуры выполнен на 10 участках покрытия. Применение метода позволило снизить количество участков нарушения целостности конструкций, при этом обеспечив большое количество контролируемых зон.

Выводы

Для предотвращения разрушения железобетонных конструкций вследствие коррозии арматуры, а также снижения затрат на трудоемкие работы по восстановлению и ремонту, необходимо применение неразрушающих методов контроля, позволяющих диагностировать коррозию на ранних стадиях или до ее начала.

Существующие методы контроля применяются преимущественно за рубежом. Значительным шагом вперед по выявлению коррозии арматуры методом потенциала полуэлемента стало введение на территории Российской Федерации ОДМ 218.3.001-2010 [1].

Метод измерения удельного электрического сопротивления бетона считается перспективным. В США и Европе ведутся определенные работы по стандартизации и внедрению данного метода.

По результатам опытного применения метода при обследовании покрытия Курского вокзала получены положительные результаты. Хочется верить, что Россия не отстанет в изучении данного метода неразрушающего контроля и в скором времени появится нормативный документ, регламентирующий его применение.

Литература

1. ОДМ 218.3.001-2010. Рекомендации по диагностике активной коррозии арматуры в железобетонных конструкциях мостовых сооружений на автомобильных дорогах методом потенциалов полуэлемента / Федеральное дорожное агентство (РОСАВТОДОР). М. , 2010.
2. Матвеев И. К., Матвеев В. К., Шевчук К. М., Дрыгин Р. М. Диагностика активной коррозии арматуры в железобетонных конструкциях мостовых сооружений // Мир дорог. 2010. № 49. С. 54-58.
3. Москвин В. И., Иванов Ф. М. и др. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. М. : Стройиздат, 1980. 536 с.

4. Баженов Ю. М. Технология бетона. М. : Изд-во АСВ, 2002. 500 с.
5. Ветров С. Н., Яковлев С. В. Специфика обследования состояния железобетонных конструкций в условиях агрессивного воздействия воды // Инженерно-строительный журнал. 2010. №7(17). С. 35-40.
6. Алексеев С. Н., Иванов Ф. М., Модры С., Шиссль П. Долговечность железобетона в агрессивных средах / под ред. Ф.М. Иванова. М. : Стройиздат, 1990. 320 с.
7. ASTM C876 Standards Test Method for Half-cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete.
8. Archie G. E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics // AIME Trans. 1942. №146. Pp. 54-62.
9. Polder Rob B. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC-154 technical recommendation // Construction and Building Materials. 2001. №15. Pp. 125-131.
10. Gowers K. R., Millard S. G. Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using Wenner technique // ACI Mater J. 1999. September-October. Pp. 536-541.
11. Broomfield J. P., Langford P. E., McAnoy R. Cathodic Protection for Reinforced Concrete: Its Application to Buildings and Marine Structures // CORROSION 87 (Houston, TX: NACE International), 1987. Pp. 222-325.

**Алексей Владимирович Улыбин, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7(812)535-57-82; эл. почта: ulybin@mail.ru

concrete testing

SilverSchmidt

Молоток для испытания бетона

Молоток SilverSchmidt представляет новейшие разработки компании и позволяет измерять прочность по ГОСТ 22690 в диапазоне от 5 до 170 Н/мм². Встроенный электронный блок, увеличенный более чем в 3 раза срок службы пружины, отсутствие влияния пространственного положения молотка на результаты измерений. Прошел тесты НИИЖБ на объектах «Москва-Сити» и «Миракс Плаза». Внесен в Госреестр средств измерений РФ.

Original Schmidt

Молоток для испытания бетона

Более 50 лет во всем мире для оценки прочности бетонов применяют молотки Шмидта. Существующие типы N, L, NR и LR позволяют измерять прочность по ГОСТ 22690 в диапазоне от 10 до 70 Н/мм². Типы NR и LR осуществляют регистрацию результатов на бумажную ленту в виде гистограммы. Внесен в Госреестр средств измерений РФ.

Profoscope

Определение местоположения стержней арматуры и толщины защитного слоя бетона

Универсальный прибор со встроенным датчиком. Удобное управление и визуализация результатов в режиме реального времени. Диапазон измерений толщины защитного слоя до 180 мм. Определение диаметра стержня, средней точки между стержнями. Внесен в Госреестр средств измерений РФ.

Profometer 5+

Определение местоположения стержней арматуры и толщины защитного слоя бетона

Прибор с выносным датчиком. Позволяет сохранять и передавать в ПК результаты измерений. Модель Scanlog позволяет в масштабе сканировать и сохранять картину арматурной сетки и получать картину распределения толщины защитного слоя. Диапазон измерения толщины защитного слоя до 180 мм. Внесен в Госреестр средств измерений РФ.

Pundit Lab+

Ультразвуковой прибор

Pundit Lab+ — ультразвуковой прибор для определения прочности на сжатие бетона SONREB-методом, а также для определения глубины поверхностных трещин в бетоне. Имеет возможность отображать форму сигнала на ПК либо осциллографе.

Hygropin

Измеритель влажности и тепературы

Прибор Hygropin обеспечивает высокую точность измерений относительной влажности и температуры бетона, т.к. измерения проводятся непосредственно под поверхностью бетона с помощью специального контактного датчика. Прибор оснащен двумя каналами, которые позволяют одновременно отображать информацию о влажности и температуре бетона и внешней среды.

Официальный представитель Proceq SA в России — ООО «Просек Рус»

Санкт-Петербург, ул. Оптиков, д. 4, к. 2, лит. А, оф. 410
Тел./факс: +7 812 448 35 00
info-russia@proceq.com
www.proceq-russia.ru

ISO 9001

proceq

Made in Switzerland

... more than 50 years of know-how you can measure!

Тепловизионное обследование железобетонных плит крепления откосов грунтовых гидротехнических сооружений

К.т.н., ведущий научный сотрудник В.Г. Штенгель*;
техник В.С. Недялков,
ОАО «ВНИИГ им. Веденеева»

Ключевые слова: метод; неразрушающий тепловой контроль; обследование; железобетонные крепления откосов; отслоение; грунтовое основание; термограмма; аномалия; видимый режим съемки

Применение методов неразрушающего контроля (МНК) неметаллических строительных конструкций является неотъемлемым требованием при проведении технического обследования эксплуатируемых сооружений. Их использование позволяет расширить информацию о фактическом техническом состоянии материалов и конструкций. Однако за внешней простотой применения методов и средств НК скрывается уровень достоверности интерпретации полученных результатов. Отметим, что для неметаллических конструкций МНК – это, прежде всего, качественные методы анализа аномалий поля косвенных информационных параметров.

Откос грунтового гидротехнического сооружения (ГТС) с бетонным креплением представляет собой двухслойную композицию, причем от состояния бетонного крепления зависит устойчивость откосов и сохранность искусственных насыпей и перемычек. Состояние бетонного крепления определяется комплексом методов: визуальным методом (состояние поверхностного слоя бетона, расположение и концентрация трещин в плитах), комплексом методов неразрушающего контроля (механический – с использованием склерометров для определения прочности поверхностного слоя бетона, ультразвуковой – для определения прочности бетона и глубины трещин, магнитный – для определения положения стержней арматуры) и исследованием опытных выбуренных кернов (оценка структуры и толщины повреждённого внешним атмосферным и волновым воздействиями и последствиями процессов промерзания–оттаивания поверхностного слоя бетона и оценка прочности бетона в глубинных слоях).

Однако проблема оперативного выявления и контроля участков отслоения плит от основания достаточно сложна. Применяемые методы (механическое простукивание, виброакустический, сейсмоакустический, ультразвуковой и др.) носят дискретный характер и не могут быть использованы для полного контроля протяженных конструкций.

В последнее время активно внедряемый геофизический контроль плит с помощью метода георадиолокации при использовании георадара также ограничен по производительности контроля, а техническая возможность контроля часто зависит от величины уклона откоса. Кроме того, фактическая толщина монолитных плит может значительно отличаться от проектной, фактическое расположение арматуры также достаточно часто произвольно, а донная поверхность плит при укладке бетонной смеси непосредственно на грунтовое основание сращивается со слоем гравия обратного фильтра, что резко увеличивает шероховатость поверхности. Естественная просадка грунта из-за уплотнения при увлажнении (бетонные крепления откоса по всей площади конструкции не бывает идеально герметичными) и при колебаниях крепления из-за волнового воздействия приводят к образованию зазоров и полостей между плитами и грунтом. Соответственно, провисшие на большой площади плиты могут деформироваться и обрушаться, обнажая грунт, который при этом будет активно вымываться. Температурно-осадочные швы между плитами над полостями будут нарушаться, что приведёт к потере герметичности покрытия, соответственно к активизации процесса увлажнения основания, и как следствие, к активизации процесса миграции песка в грунте и к росту осадочных явлений в основании.

Такие процессы в отдельных случаях становятся причиной разрушений бетонных креплений, приводящих к полному выходу сооружений из строя. Пример – авария на деривационном канале Земо-Авчальской ГЭС (Грузия) в 1987 году, когда в результате вымывания грунта из-под бетонной облицовки произошло спонтанное разрушение насыпи между ложем канала и рекой Курой (рис. 1). Это привело к быстрому опорожнению канала через проран и, как следствие, к серьёзной обстановке в зоне прорыва и к выводу ГЭС из эксплуатации на длительный срок. При последующем техническом обследовании монолитной бетонной облицовки откосов канала были выявлены многочисленные отслоения плит от грунтового основания и значительные подплитные полости. Своевременное выявление и устранение дефекта отслоения

бетонного крепления от грунтового основания повысит надежность долговременной эксплуатации грунтовых откосов ГТС различного назначения.

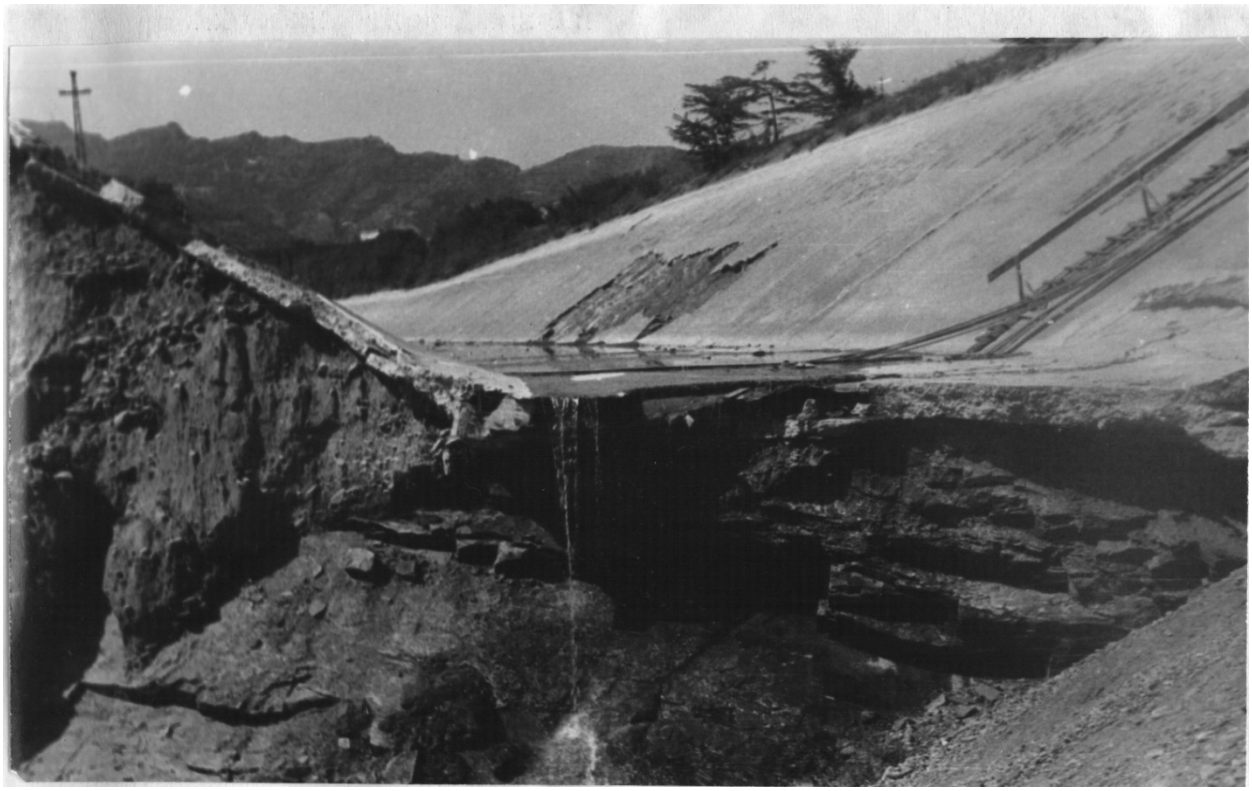


Рисунок 1. Разрушение ложа деривационного канала Земо-Авчальской ГЭС (Грузия). Фрагмент дна канала

Один из современных МНК зданий и сооружений – тепловой метод, основанный на получении тепловизионных картин исследуемой поверхности участков сооружений, он может быть при определённых условиях применён для выявления данного дефекта. Однако полученные результаты подвержены значительным фоновым воздействиям, зависят от особенностей структуры диагностируемого материала, его поверхности и прочего (рис. 2) [1]. Отдельные элементы методических решений, учитывающие особенности обследования неметаллических строительных конструкций, изложены в технической литературе прилагаемого списка [1–15]. Они были проанализированы, но в данной статье прикладного характера не рассматриваются.

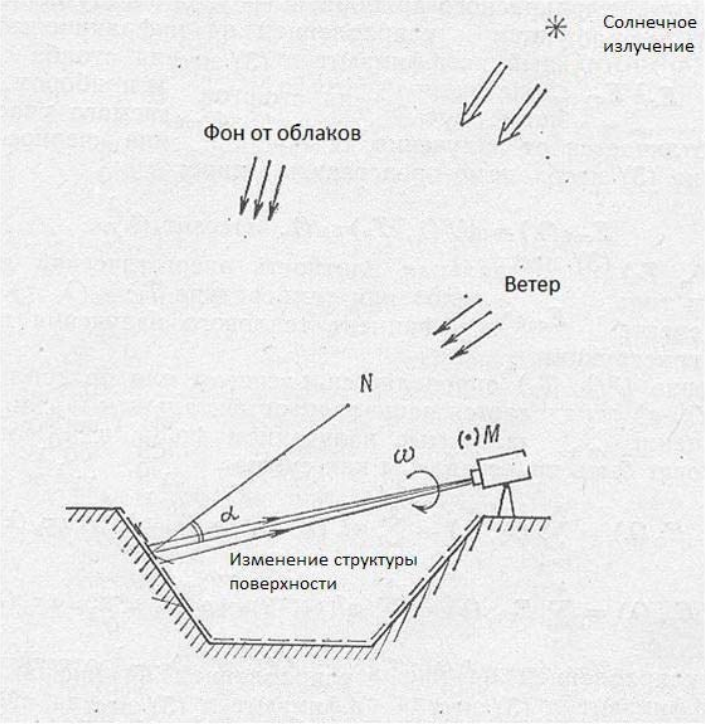


Рисунок 2. Некоторые внешние факторы, влияющие на показания тепловизора

Цель данной работы – проверка работоспособности теплового метода в реальных натурных условиях с учетом особенностей обследуемых конструкций и с отработкой методики тепловизионного обследования. На примере решения конкретной задачи на определённом

объекте разработаны методы повышения достоверности полученных результатов и снижения операторских ошибок и ошибок в интерпретации результатов.

Рисунок 3. Обследование откосов шлюза-распределителя ГАЭС

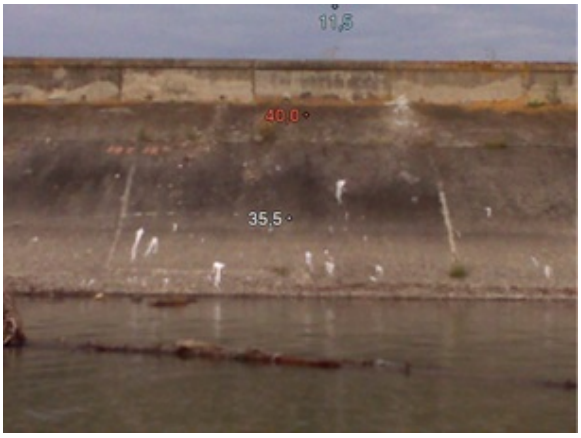


Рисунок 4. Фрагмент обследуемого бетонного крепления откоса плотины (вид с лодки)

Проведён поиск отслоений в контактных зонах «плита – основание» железобетонного крепления откосов грунтовой плотины Кубанского водохранилища протяженностью 6800м, а также двух откосов нижнего бьефа шлюза-распределителя ГАЭС длиной по 200 м каждый (рис. 3). Сооружения построены в 1968 году и неоднократно ремонтировались. Откосы плотины заложены под углом 26–30º, проектная толщина плит 200 мм. Основание под плитами – сухой песок, под швы плит уложен гравийный обратный фильтр. Тепловизионный доступ к плитам возможен с воды, т.е. с лодки.

Угол заполаживания откосов берегов нижнего бьефа шлюза-распределителя 35–45º, проектная толщина монолитных плит 200 мм, сборных плит – 150 мм, грунтовое основание – сухой песок, под швы плит уложен гравийный обратный фильтр. Доступ к откосу осуществлялся с противоположного берега, с расстояния до 70 м. В период обследования (август 2011 г.) средняя дневная температура воздуха составляла +30ºС. Ночная температура колебалась в пределах от +10º до +15ºС. В период обследования было практически полное безветрие. Источник тепла – естественный солнечный нагрев. Плиты обследовались в двух тепловых режимах: на максимальном нагреве в дневное время (плиты над полостями более теплые, чем на грунте) и на максимальном охлаждении в утреннее время (плиты над полостями более холодные, чем плотно контактирующие с грунтом, аккумулирующим при нагреве теплом).

Для исследования был выбран комбинированный метод, основанный на получении тепловых характеристик объекта с помощью тепловизора с последующим анализом зон с предполагаемым наличием дефекта контакта плита-основание, контролем их при помощи апробированных методов и выделением их из общего информационного поля по объекту. Таким образом, локализуется зона дальнейших исследований протяженных крупноразмерных объектов, что приводит к повышению производительности детального обследования.

Метод тепловизионного контроля (МТК) приемлем при допущении, что объект, представляющий систему «песчаное основание–контактное пространство–бетонная плита крепления откоса», не содержит отслоений. В этом случае в системе устанавливается кусочно-однородное температурное поле. Если в контактном пространстве произошли нарушения, т.е. образовалось отслоение бетонной плиты откоса, объем которого превосходит объем пор грунта, непосредственно контактирующего с плитой, то в контактном пространстве (в зоне отслоения) происходит локальное изменение температуры. Бетонные плиты крепления откосов подвержены нагреву от солнечного излучения (рис. 4).

Обнаружить можно дефекты, у которых размеры, глубина залегания и теплофизические характеристики создадут на поверхности бетонной плиты местное контрастное повышение температуры, соизмеримое с температурной чувствительностью регистрирующего прибора. Измерения следует проводить в моменты проявления наибольшего температурного контраста дефектного и бездефектного участков. В результате теплового сканирования поверхности бетонных плит откосов получается наглядная картина температурного поля. Ошибки в определении абсолютного значения температуры не мешают определить контуры отслоения (дефекта) по температурному контрасту его на тепловом поле. Отслоение бетонной облицовки

откосов четко выявляется по градиенту температур и практически не зависит от толщины воздушного пространства под плитами, так как теплопроводность воздуха в 60 раз меньше, чем теплопроводность бетона [2].

В качестве средства измерения температурного поля был применен специализированный строительный тепловизор Fluke TiR 32, обладающий высокой чувствительностью около 0,05°С в рабочем диапазоне температур около 30°С. Погрешность измеряемых температур не превышает ±2°С. Прибор имеет высокую ударопрочность, что позволяет использовать его в сложных полевых условиях, карту памяти и синхронизированные камеру инфракрасного диапазона и фотокамеру видимого диапазона. Общая масса прибора около 1 кг. Возможность слитного отображения инфракрасного и видимого изображений на одном дисплее значительно ускоряет и упрощает идентификацию объектов путем сравнения термограмм контролируемых участков с видимым изображением той же плиты (рис. 5а, 5б).

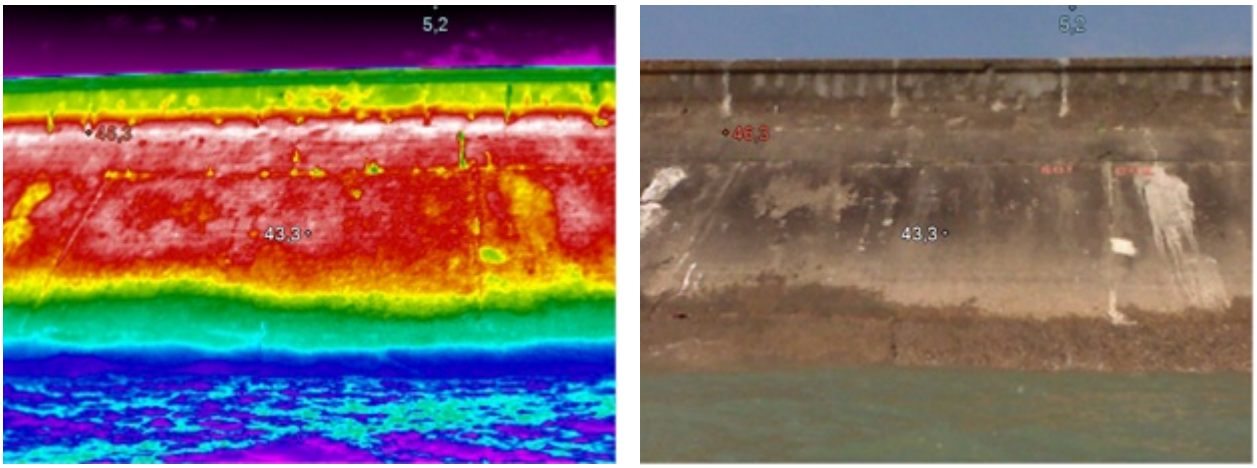


Рисунок 5 а,б. Пример совмещения термограммы и видимого режима контролируемого участка откоса

Измерения проводились в два этапа: в утренние и вечерние часы, поскольку при прогреве температура части плиты над пустотной частью выше, чем тех участков, которые плотно прилегают к основанию, а при остывании она опускается быстрее, чем над участком с плотным контактом с основанием.

При анализе термограмм (рис. 5а) одновременно сравниваются соседние участки бетонного крепления откоса. При этом влиянием метеоусловий и временем съемки можно пренебречь. Однако при уменьшении теплового контраста дефектных и бездефектных участков возможность пропуска дефектов незначительной площади увеличивается.

Полученные результаты:

1) нагрев плит в значительной степени зависит от угла падения солнечных лучей и от положения контролируемых участков относительно солнца;
2) результат зависит от угла между воображаемой горизонтальной прямой, исходящей из центра линзы прибора, и плоскостью откоса (рис. 2);
3) интенсивность теплового излучения плит зависит от фактического нагрева и ветрового отъема тепла;
4) параметр, максимально влияющий на достоверность информации по контрасту температур смежных участков, – изменение толщины монолитных плит;
5) обследовались соседние участки откосов, поэтому постоянно действующими факторами можно было пренебречь.

На термограммах четко выделяются аномальные тепловые пятна (рис. 6,7,8), которые часто оказываются пятнами бетона другого цвета, участками плит, обросшими мхом, с разрушениями поверхностного слоя, плитами со следами ремонта («набетонкой» на повреждённую поверхность), остатками ремонтного состава на поверхности плит и т.д. На практике только по термограмме сразу выделить участки поверхности откосов, которые можно интерпретировать, как имеющие отслоения от грунта, достаточно сложно. В этом случае необходимо сравнить термограмму с фотоизображением и принять решение о необходимости дальнейшего исследования участка.

Удалось выявить ряд участков крепления откосов, которые были отнесены к дефектным. При контрольной проверке с помощью ударов молотка на этих участках проявляется характерное «бухтение» на фоне соседних бездефектных зон, которые под ударом молотка звенели. На приведенных рисунках тепловые аномалии (пятна) отчетливо видны. На синхронизированных снимках теплового и видимого изображения видны элементы поверхности, которые являются ложными тепловыми пятнами. В процессе обследования плотины протяженностью 6,8 км было выявлено около двухсот участков плит с предполагаемым наличием отслоений. Факт отслоения подтвердился на 99 участках (около 50% от общего количества участков с тепловой аномалией).

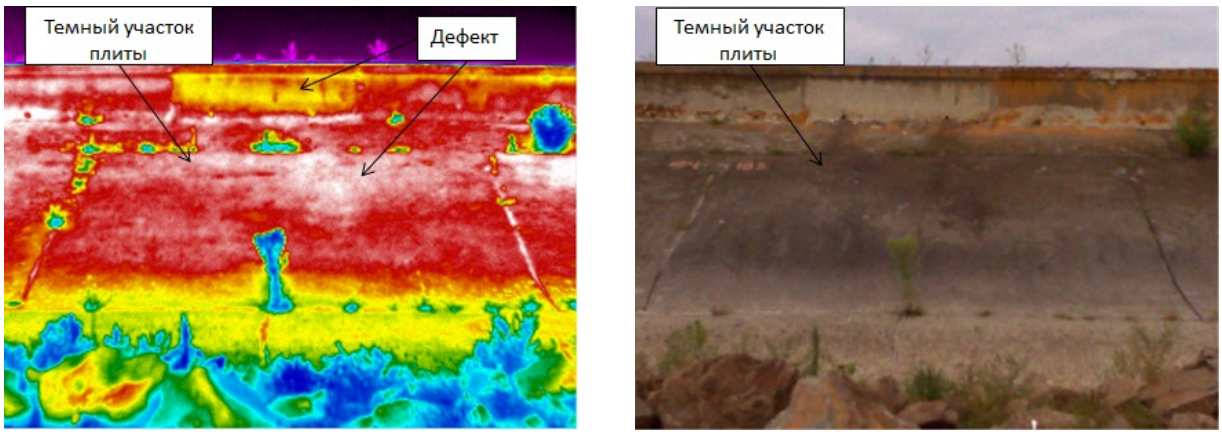


Рисунок 6. На термограмме отмечены 2 участка. Один соответствует потемневшему верхнему слою бетона плиты, другой – дефекту в другой части плиты. Парапет бетонного крепления также имел внутренние расслоения

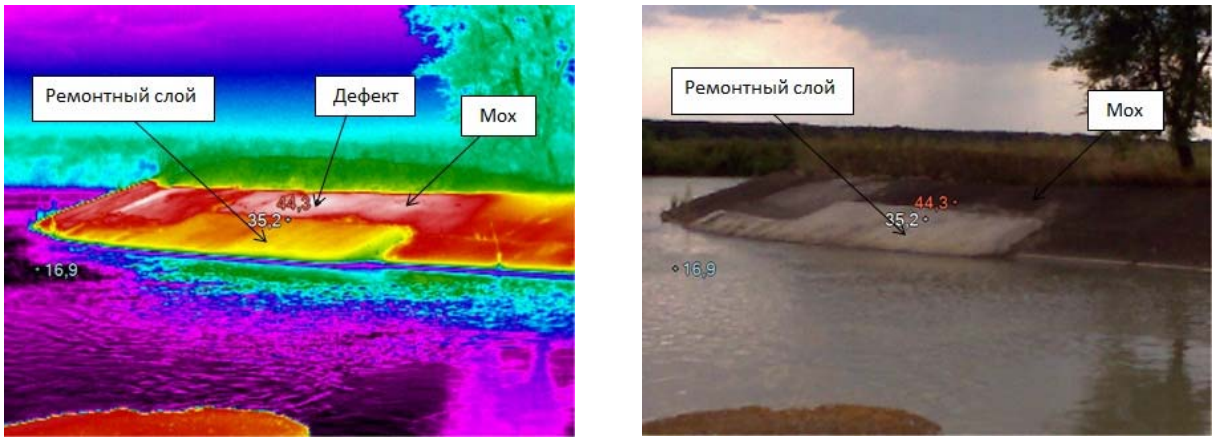


Рисунок 7. Обозначена зона дефекта, где было обнаружено отслоение. Ремонтный слой на термограмме может вызвать иллюзию дефекта, но на видимом режиме отчетливо видно, что это не дефект. Ещё одна аномалия, по температурному контрасту похожая на дефект, оказалось участком плиты, обросшим мхом

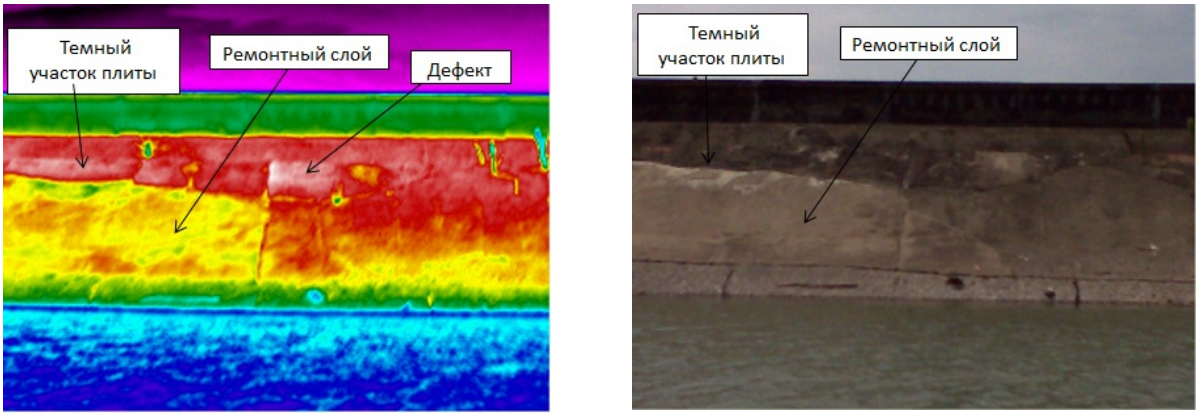


Рисунок 8. Совокупность аномалий на термограмме, соответствующих участкам плиты с тёмной поверхностью, с ремонтным слоем и непосредственно с дефектом

Анализ термограмм по всей длине сооружений показал, что максимальная концентрация участков отслоений наблюдалась вдоль верхней кромки откосов и вдоль температурно-осадочных швов. Это, в принципе, соответствует последствиям одного из основных факторов образования отслоений и полостей – просадки верхней части грунтовых плотин из-за естественного уплотнения грунта основания, усугубленного периодическим увлажнением атмосферными осадками и волновыми воздействиями, а также из-за нарушений дренажных систем грунтовых плотин и гидроизоляции швов в дренажных и водоотводящих конструкциях.

Выводы

1. На рассматриваемом примере демонстрируется, что при методе общего нагрева композитной строительной конструкции с использованием активного режима тепловизионного обследования (во время нагревания) из-за локальных неоднородностей различного типа наружной поверхности возможно получение большого количества ошибок при интерпретации полученных информационных аномалий в отраженном тепловом поле. Количество этих ошибок снижается при получении и анализе идентичных по расположению аномалий теплового поля в пассивном режиме, когда композитная строительная конструкция излучает накопленное в активном режиме тепло (в данном случае при остывании нагретых бетонных плит).
2. Ошибки идентификации дефектов (в данном случае расслоение композитных конструкций) в активном режиме значительно снижаются при анализе синхронных тепловизионного и визуального изображений одних и тех же участков контролируемой конструкции.
3. Применение тепловизора, сочетающего в себе синхронизированные инфракрасную и фото камеры, позволяет оперативно выполнить общую дефектоскопию протяженных участков гидротехнических сооружений. В данном случае выявлялись участки отслоения бетонных плит крепления от грунтового основания ГТС.
4. При анализе результатов необходимо учитывать и отбраковывать заведомо ложные аномалии теплового поля участков сооружения, связанных с состоянием поверхностного слоя бетона или близостью маскирующих факторов: воды, растительности и др.
5. В процессе тепловизионного обследования часто встречающихся в гидротехнических сооружениях конструкций – бетонных креплений откосов грунтовых сооружений (плотины, каналы, и др.) – более 50% аномалий теплового поля, полученных при активном режиме тепловизионного обследования, связано не с дефектами в виде отслоения плит от основания, а с особенностями поверхностного слоя бетона и маскирующими факторами.
6. Практика показала, что проводить съемки целесообразно не в период максимальной солнечной интенсивности или ночного охлаждения, а позже, когда плиты по сечению будут более равномерны по температуре. Измерения следует производить в момент проявления наибольшего температурного контраста. Временной сдвиг во многом зависит от толщины плит, то есть от возможности аккумулировать тепло или холод, и от иных условий, но обычно составляет 2-4 часа.
7. В дальнейшем для исследования креплений предполагается совместное использование тепловизора и георадара. Тепловизионная локализация участков отслоения позволит значительно сократить объем георадарных исследований. Георадар, в свою очередь, позволит определить параметры отслоений [16].
8. Экспериментально подтвердилось, что для откоса грунтовой плотины отслоения грунтового основания от плит крепления наиболее часто встречаются вдоль верхней кромки гребня плотины и под температурно-осадочными швами между плитами.
9. Причинами отслоений следует считать локальную осадку грунтового (песчаного) основания из-за увлажнения, вызванного нарушением гидроизоляции температурно-осадочных швов между плитами и водосборного лотка на гребне плотины.

Литература

1. Ялышев Ф. Х. К вопросу о бесконтактных измерениях температур строительных конструкций гидротехнических сооружений инфракрасными приборами // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1990. Т. 221. С. 46-52.
2. Горбунов В. И., Епифанцев Б. Н., Гефле Г. Х., Немирович-Данченко М. М. Обнаружение воздушных полостей под бетонными покрытиями тепловым методом // Дефектоскопия. 1980. №11. С. 109-111.
3. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение / Пер. с франц. М. : Мир, 1989. 416с.
4. Ялышев Ф. Х. Оптические методы контроля зданий и сооружений: Контроль качества теплозащиты. Л. : Стройиздат, 1989. 80 с.
5. Дубовик Л. Я., Долгов В. А. Об использовании термографических методов для диагностики гидротехнических сооружений // Известия ВНИИГ им Б.Е. Веденеева. 1990. Т. 221. С. 52-55.
6. Карманов И. В., Хорьков В. И., Дубовик Л. Я., Долгов В. А. Возможности использования ИК-радиометров по выявлению внутренних неоднородностей строительных конструкций гидротехнических сооружений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1990. Т. 221. С. 69-73.
7. Вавилов В. П., Александров А. Н. Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике. М. : НТОР «Энергопрогресс», 2003. 76 с.
8. Дроздов В. А., Сухарев В. И. Термография в строительстве. М. : Стройиздат, 1987. 240 с.
9. Будадин О. Н., Потапов А. И., Колганов В. И., Троицкий-Марков Т. Е., Абрамова Е. В. Тепловой неразрушающий контроль изделий. Научно-методическое пособие. М. : Наука, 2002. 472 с.
10. Вавилов В. П., Горбунов В. И. Тепловые методы неразрушающего контроля многослойных структур // Дефектоскопия. 1981. №4. С. 5-22.
11. Неразрушающие методы испытания бетона / под ред. О.В. Лужина: Совм.изд. СССР – ГДР. М. : Стройиздат, 1985. 236 с.
12. Будадин О.Н., Абрамова Е. В., Троицкий-Марков Т. Е. Комплексный тепловой контроль зданий и строительных сооружений // В мире неразрушающего контроля. 2004. № 1. С. 22-24.
13. Будадин О. Н., Смирнов Ю.В., Троицкий-Марков Т.Е. и др. Тепловой контроль и мониторинг технического состояния опасных объектов в условиях ограниченного доступа // В мире неразрушающего контроля. 2008. №3. С. 32-33.
14. Будадин О. Н., Абрамов Е. В., Родин М. А., Лебедев О. В. Тепловой неразрушающий контроль зданий и строительных сооружений // Дефектоскопия. 2003. №5. С. 77-94.
15. Вавилов В. П. Тепловой контроль композитных материалов // В мире неразрушающего контроля. 2008. №4. С. 32-35.
16. Глазунов В. В., Ефимова Н. Н., Штенгель В. Г. Оценка состояния грунтов основания железобетонных элементов гидросооружений методом георадиолокации // В мире неразрушающего контроля. 2006. №1. С. 18-21.

**Вячеслав Гедалиевич Штенгель, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7(812)493-93-87; эл. почта: ShtengelVG@vniig.ru

Мониторинг уникальных объектов с использованием динамических параметров по ГОСТ Р 53778-2010

Д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник С.Н. Савин*;
научный сотрудник С.В. Демишин;
старший научный сотрудник И.В. Ситников,
Филиал ОАО «26 ЦНИИ»

Ключевые слова: динамические характеристики зданий; жесткость конструкций; мониторинг зданий; диагностика строительных конструкций

25 марта 2010 г. утвержден и введен в действие национальный стандарт Российской федерации ГОСТ Р 53778-2010 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния». В новом нормативном документе впервые введены требования о необходимости «…измерения динамических параметров здания и сооружения…» как при мониторинге технического состояния зданий и сооружений, так и для заполнения соответствующих разделов «Паспорта здания». При этом в качестве таких параметров указаны периоды основного тона колебаний «вдоль малой, большой и вертикальной осей», а также соответствующие им значения «логарифмического декремента основного тона собственных колебаний».

Введение новых требований по обязательной оценке динамических характеристик зданий и сооружений для мониторинга их технического состояния, несомненно, является серьезным шагом на пути реализации требований Федерального закона от 30.12.2009 №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

Следует отметить, что ранее такие требования уже вводились для организаций МО РФ и МЧС России [1-3] и широко внедрялись как для мониторинга специальных объектов, так и для зданий и сооружений ведомственной принадлежности. Применялись эти методы и за рубежом [4-5], а в советской классификации используемый метод известен как «метод свободных колебаний». В частности, динамические характеристики использовались для диагностики пролетных конструкций мостов в ЦНИИС в лаборатории Звягинцева А.Н. [6], а применение вибромашин было практически единственным способом динамических испытаний в советский период [7].

В 1990 году в ходе паспортизации зданий и сооружений сотрудниками научно-исследовательского института (НИЦ 26 ЦНИИ) на полуострове Камчатка были обследованы десятки жилых зданий с определением их динамических характеристик для оценки фактической сейсмостойкости [8-9]. В дальнейшем эти работы не прекращались и список обследованных сооружений, для которых определялись динамические характеристики по оригинальным методикам, разработанным в Научно-Исследовательском центре Министерства обороны, был значительно расширен и дополнен как уникальными сооружениями, расположенными в сейсмоопасных районах, так и ведомственными объектами в Санкт-Петербурге и Москве [10-12]. При этом практика динамических испытаний «методом свободных колебаний» выявила как определенные трудности методического характера, так и необходимость использования для этих целей специальной высокочувствительной аппаратуры, средств регистрации и обработки, что нашло свое отражение в ряде публикаций того времени [13-14]. Цель предложенной работы – дать представление как об особенностях проведения мониторинга уникальных зданий и сооружений, так и о неоднозначности интерпретации получаемых параметров.

Рассмотрим на примере Кронштадтского Морского собора эффективность использования динамических характеристик для диагностики его технического состояния.

Определение динамических характеристик здания собора проводилось дважды: в период с 10 марта по 10 апреля 2005 г. и в период 22-26 июня 2009 г. Целью испытаний являлось определение технического состояния здания по результатам сравнительного анализа его пространственной жесткости.

Для оценки динамических характеристик на каждом этапе мониторинга (собственных частот колебания, форм колебания храма) использовались средства и методы, разработанные в организациях Министерства обороны.

Обследуемый объект выполнен по жесткой конструктивной схеме с продольными и поперечными несущими стенами, кирпичными и бетонными колоннами, куполами и перекрытиями. Центральный купол и главные конхи – из армированного бетона.

В результате испытаний, проведенных в 2009 г., получены следующие значения собственных частот колебаний:

- 2.7 Гц – первый тон, поперечное направление;
- 3.0 Гц – первый тон, продольное направление;
- 3.78 Гц – крутильные колебания.

Кроме того, имеют место сложные колебания (осесимметричные) на близкой к основным формам частоте: 4,4 Гц.

Сравнительный анализ собственных частот колебаний здания в марте 2005 г. и в июне 2009 г. показывает, что:

- собственная частота колебаний здания по первому тону в продольном направлении практически не изменилась и составляет 3,0Гц (значения частоты, полученные при испытаниях в 2005 г., составляли 3,01 Гц);
- собственная частота колебаний здания по первому тону в поперечном направлении **снизилась на 12 %** (была 3,08 Гц, стала 2,7 Гц), что соответствует **снижению жесткости на 17 %,** см. спектры колебаний 2005 и 2009 гг., представленные на рис. 1;
- частота крутильных колебаний снизилась на 7%;
- частоты «осесимметричных» колебаний снизились на 6% в обоих направлениях, что косвенно свидетельствует об отсутствии изменений в степени защемления фундаментов.

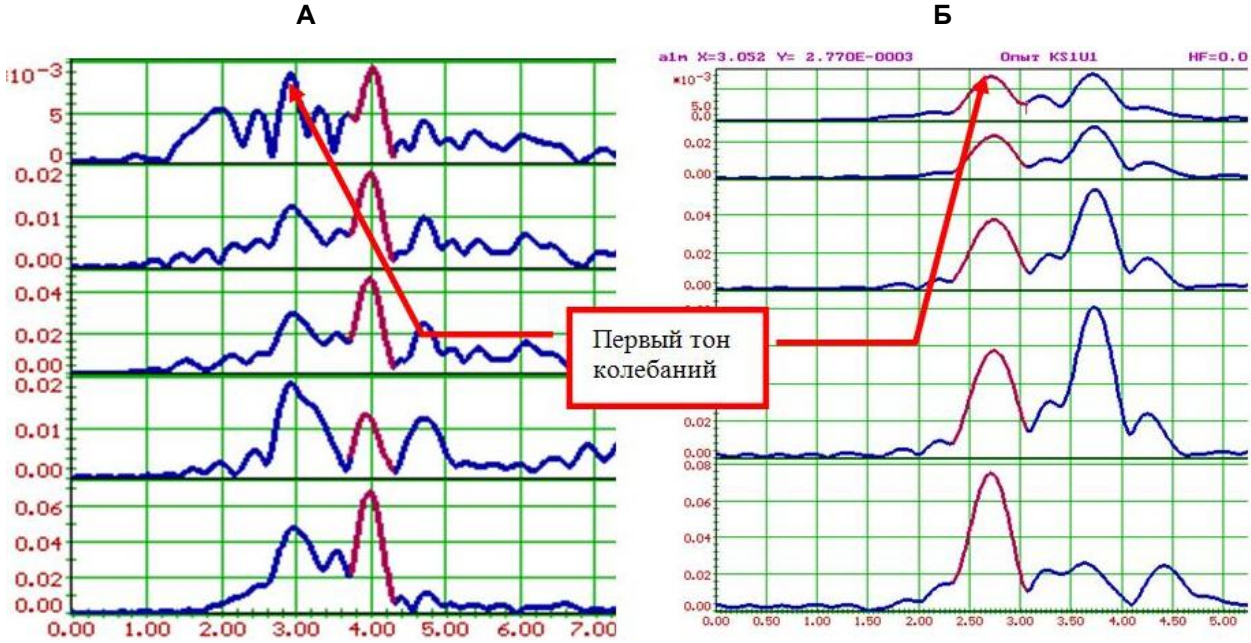


Рисунок 1. Амплитудный спектр. Первый тон. Вертикальный створ, поперечное направление. А) измерения 2005 г.; Б) измерения 2009 г.

Таким образом, можно предполагать, что с 2005 г. произошли определенные изменения в состоянии несущих конструкций, повлекшие снижение пространственной жесткости сооружения.

Если теперь вернуться к требованиям ГОСТ Р, то все, что остается в случае получения такого рода результата, это провести повторное обследование через два года, если здание находится в работоспособном состоянии, или провести обязательное внеплановое обследование, если здание находится в ограниченно работоспособном состоянии. На наш взгляд, этого явно недостаточно, поскольку можно значительно расширить информативность «динамических параметров», проанализировав, например, не только собственные частоты, но и формы колебаний.

На рис. 2 приведены формы колебаний в поперечном направлении, относящиеся к периодам 2005 г. (прерывистая линия) и 2009 г. (сплошная линия). Анализ эпюр наглядно

показывает, что при одинаковой степени защемления фундаментов отмечается заметное снижение жесткости в уровне 0–16 м.

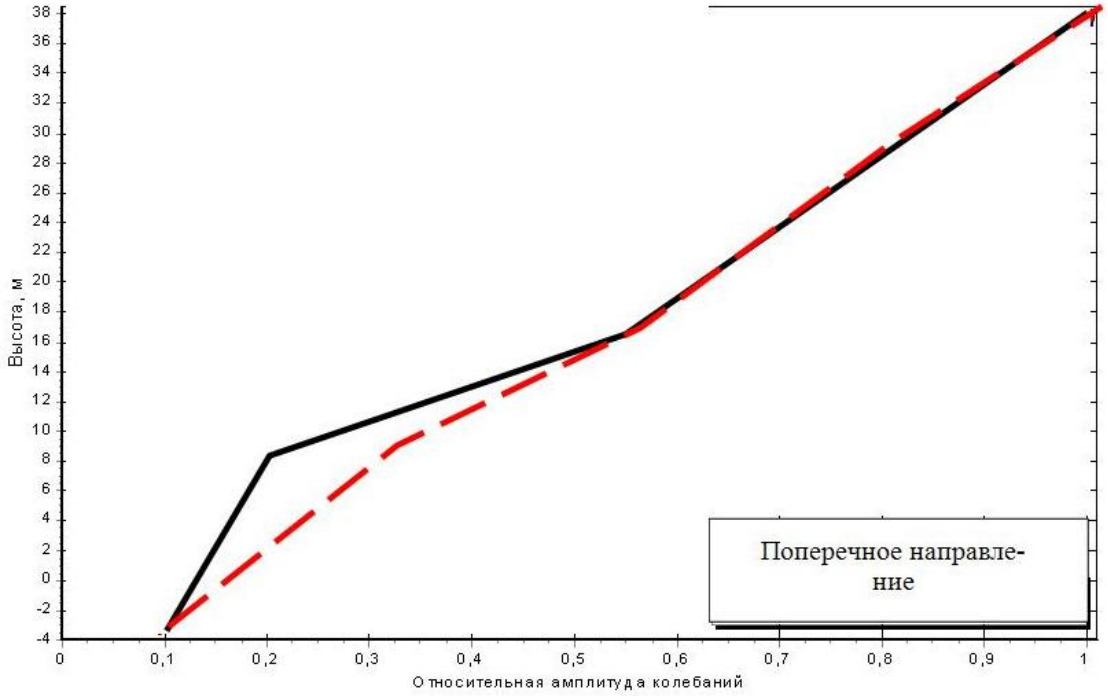


Рисунок 2. Эпюры колебаний сооружения по первому тону (поперечное направление). Прерывистая линия (2,7 Гц) – 2009 г., сплошная – (3,08 Гц) 2005 г.

Объяснением этого может служить гипотеза о потере связи основного объема сооружения с «контрфорсами», роль которых выполняют лестничные клетки, располагающиеся по обеим сторонам здания до высоты 20 м. По-видимому, имеющиеся вертикальные трещины по линии соединения контрфорсов и основного объема здания освободились ото льда и обеспечили податливость в поперечном направлении (измерения в 2005 г. проводились в марте и, возможно, стены здания и трещины были «заморожены»). Косвенным подтверждением этой гипотезы может служить тот факт, что частота крутильных колебаний снизилась всего на 7%, что вдвое меньше, т.е. доля поперечной податливости присутствует, но она значительно ниже.

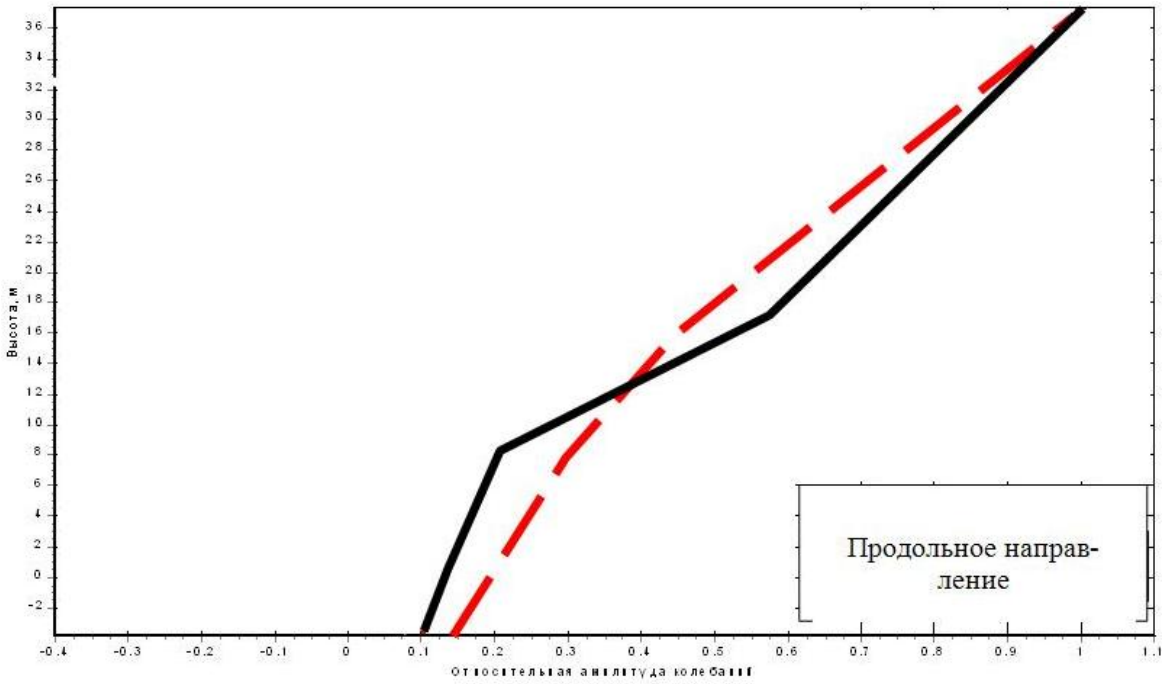


Рисунок 3. Эпюры колебаний сооружения по первому тону (продольное направление). Прерывистая линия (3,0 Гц) – 2009 г., сплошная – (3,01 Гц) 2005 г.

Сопоставительный анализ эпюр колебаний в продольном направлении (рис. 3) также не противоречит предложенной гипотезе. Очевидно, что выключение из процесса колебаний «контрфорсов» снизило жесткость здания и в продольном направлении. Об этом свидетельствует изменение наклона эпюры и увеличение относительной податливости фундаментов. Однако при этом снизилась масса сооружения, что компенсировало снижение частоты колебаний, которая осталась неизменной.

Таким образом, можно предполагать, что с 2005 г. по 2009 г. произошли определенные изменения в состоянии несущих конструкций Собора, повлекшие снижение пространственной жесткости всего сооружения. По всей видимости, эти изменения связаны с отделением «контрфорсов», роль которых выполняют лестничные клетки, от основного объема сооружения из-за раскрытия трещин и вытаивания влаги в теплый период.

Другим объектом мониторинга, на котором определялись динамические характеристики, являлись своды-оболочки цеха ЖБИ-2 ДСК-3 в Санкт-Петербурге. Определение динамических характеристик проводилось в 2004 и 2010 гг. в связи с необходимостью объективной оценки технического состояния уникальных конструкций.

Свод-оболочка представляет собой цельную конструкцию, состоящую из пяти однотипных бочарных сводов со стрелой подъема 10 метров, шириной 7,5 м и длиной 100 м.

Каждый свод представляет собой арочную конструкцию, состоящую из сборной железобетонной скорлупы, образующей верхний пояс, и двух предварительно напряженных затяжек. Промежутки между сводами длиной 2,5 м перекрываются сборными железобетонными плитами, опирающимися на консоли бортов скорлупы сводов. Каждый свод состоит из девяти рядовых, двух переходных и двух опорных секций. Внутри свода выполнены диафрагмы поперечной жесткости.

Затяжки размером 850x290x8200 мм выполнены с пазами на боковых поверхностях для размещения пучковой арматуры. Для крепления затяжек применена система подвесок из уголковой стали 75x75 мм с двумя диагональными связями, располагаемыми в третях свода. По оболочке выполнено покрытие из утеплителя и рулонного изолятора. Толщина покрытия 100 мм.

Определение динамических характеристик осуществлялось «методом свободных колебаний». При этом измерения проводились в 2004 и 2010 гг. по одним и тем же измерительным схемам, а состояние конструкции оценивалось путем сравнения жесткостных характеристик оболочки – значений периодов собственных колебаний.

Как показывает опыт обследований, снижение собственной частоты колебаний по первой форме свидетельствует об изменении жесткости в местах опирания конструкции, а по второй и более высоким формам – об изменении прочности материала, из которого выполнена конструкция.

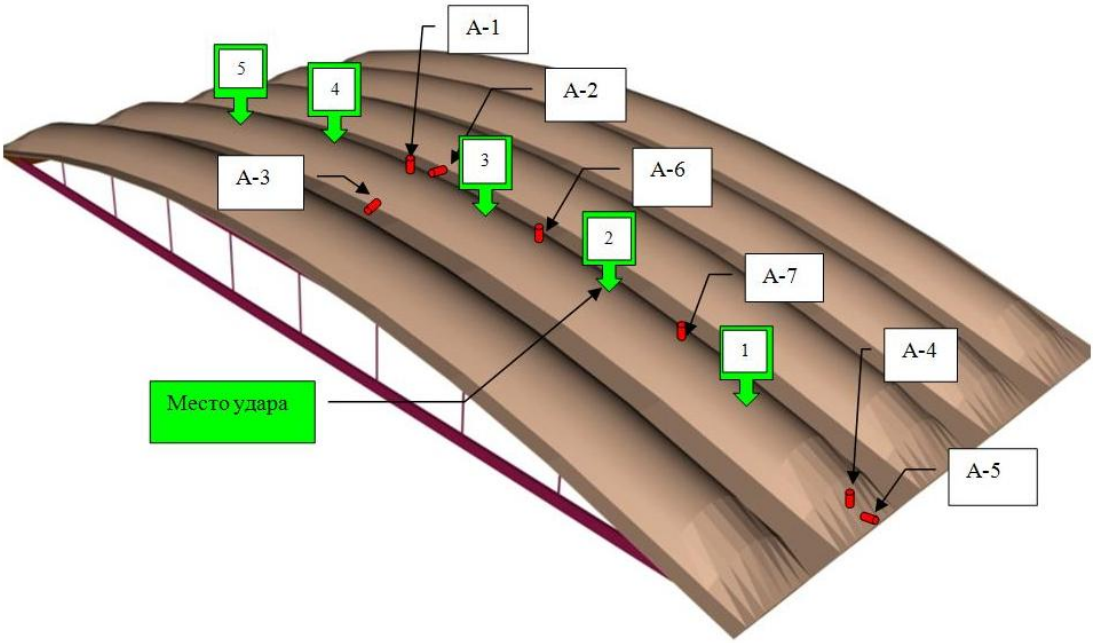


Рисунок 4. Типовая схема проведения испытаний

В соответствии с ранее разработанными методическими рекомендациями микроколебания возбуждались путем создания серии нагрузок в различных точках покрытия при различных схемах расстановки измерительных датчиков. Для выделения каждой формы колебаний создавались комбинации воздействий, имитирующие одновременное приложение нагрузки в заданных точках конструкции и в заданных направлениях. На рис. 4 представлена одна из схем расстановки датчиков, которая использовалась при испытаниях покрытия. Пример результатов измерения колебаний покрытия приведен на рис. 5 и 6 (модули спектров Фурье). Как видно из приведенных записей, выделенные частоты свободных колебаний (отмечены красным цветом) составляют 1,68 и 2,0 Гц. Кроме того, выделены следующие частоты колебаний: 2,4 Гц; 2,85 Гц; 3,5 Гц; 4,05 Гц.

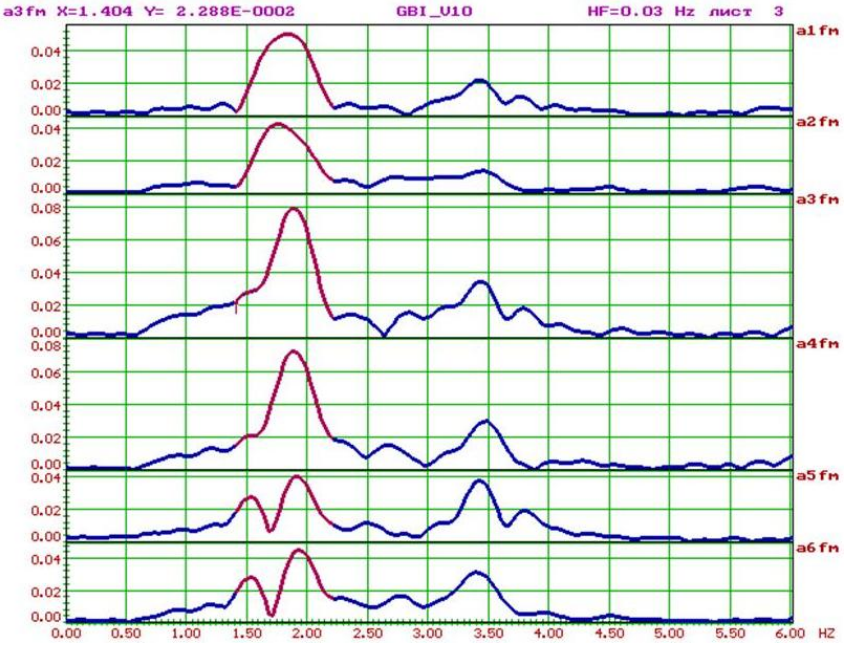


Рисунок 5. Модули спектров Фурье. Выделены колебания на частоте 2,0 Гц

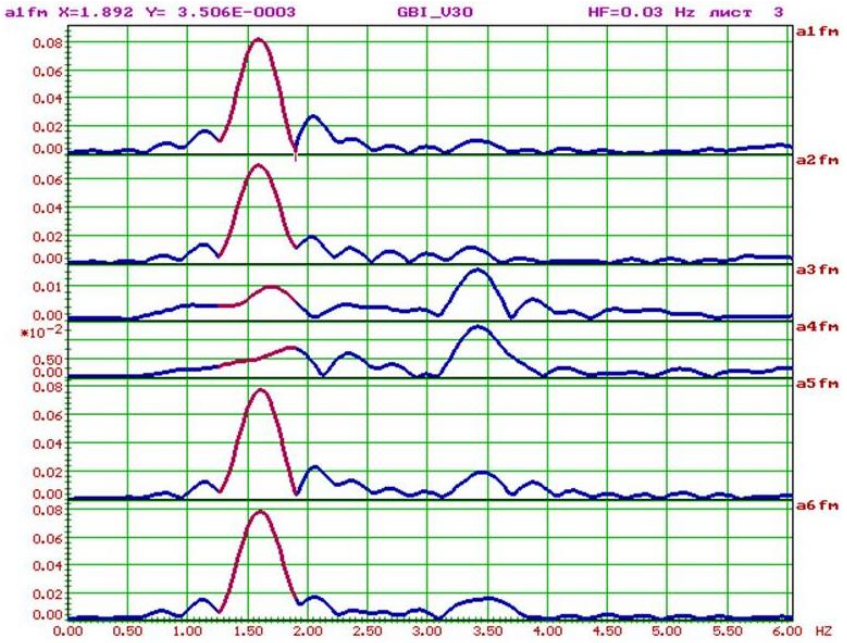


Рисунок 6. Модули спектров Фурье. Выделены колебания на частоте 1,68 Гц

Анализ полученных результатов показывает, что во всех случаях величины собственных частот колебаний оболочки покрытия, полученные при повторном исследовании в 2010 г., имеют значения не ниже данных 2004 г. и различаются в пределах погрешности измерений. На рис. 7 и 8 приведены в качестве сравнения модули спектров Фурье колебаний оболочки покрытия в 2004 г. и современные (2010 г.) измерения.

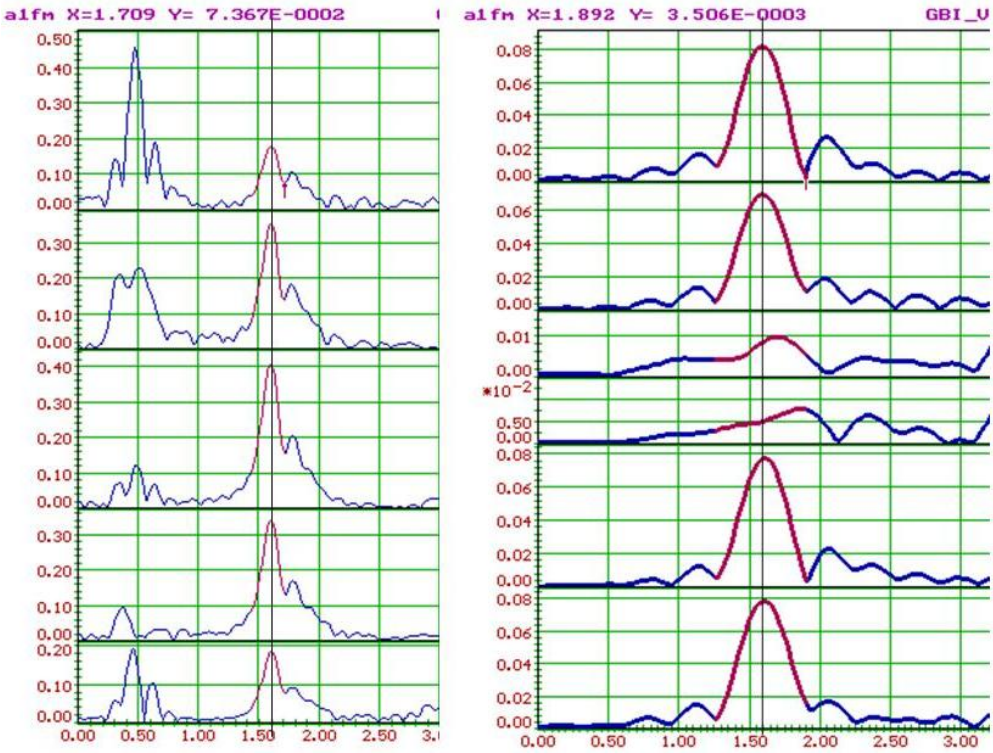


Рисунок 7. Модули спектров колебаний оболочки на частоте 1,59 Гц (2004 г.) и 1,60 Гц (2010 г.)

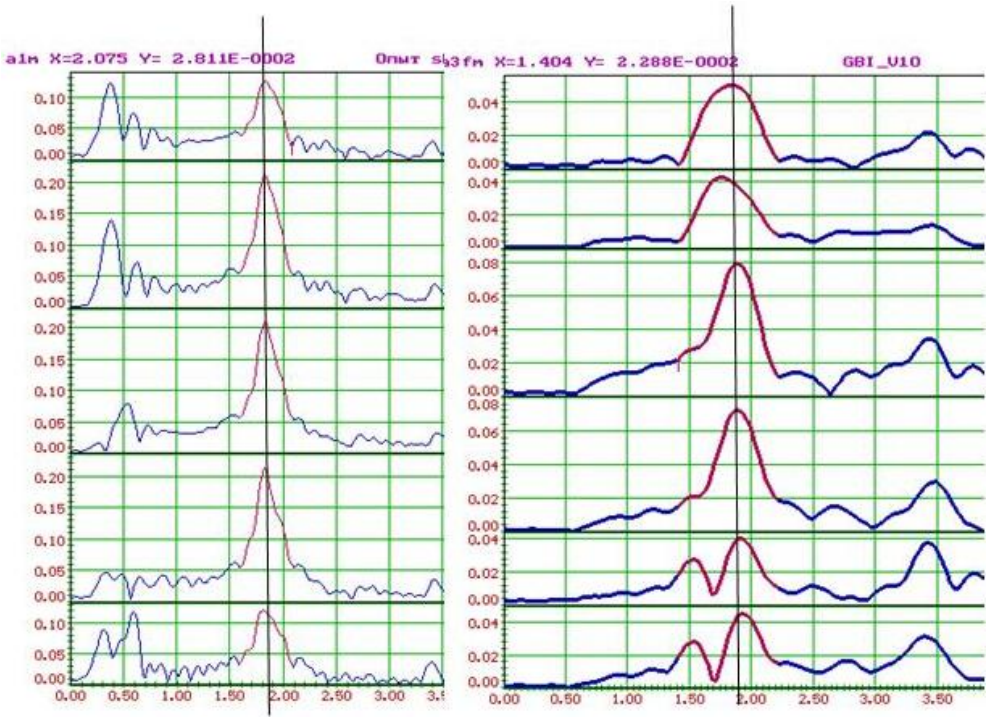


Рисунок 8. Модули спектров колебаний оболочки на частоте 1,85 Гц (2004 г.) и 1,90 Гц (2010 г.)

Приведенные примеры являются наглядным подтверждением как высокой эффективности использования динамических характеристик для мониторинга зданий и сооружений, так и явной недостаточности требований ГОСТ Р по необходимому набору регистрируемых параметров.

В частности, вместо «передаточных функций объектов» следовало бы предложить построение форм (эпюр) колебаний, а число фиксируемых частот колебаний по основным формам не регламентировать жестко указаниями «вдоль длинной, короткой и вертикальной» осей здания. Кроме того, имело бы смысл для наиболее распространенных конструктивных схем указать

ориентировочные значения частоты колебаний, чтобы был возможен предварительный анализ при первых измерениях. А для зданий смешанных конструктивных схем с неравномерно распределенными весовыми или жесткостными характеристиками следовало бы рекомендовать чисто методические приемы, например, по регистрации специфических форм колебаний. В этом случае определяются динамические характеристики для изгибных колебаний относительно горизонтальной оси здания и т.п.

Все это, по нашему мнению, является достаточно веским основанием рекомендовать разработку пособия к ГОСТ Р 53778-2010, которое бы более подробно раскрывало методические и другие аспекты процесса определения динамических характеристик при мониторинге зданий и сооружений, особенно уникальных.

Литература

1. ВСП 22-01-95. Правила паспортизации и оценки фактической сейсмостойкости воинских зданий и сооружений / МО РФ. М. , 1996. 44 с.
2. Пособие по расчетно-экспериментальной оценке сейсмостойкости общевойсковых зданий и сооружений (к ВСП 22-01-95) / МО РФ. М. , 2004. 108 с.
3. Методика оценки и сертификации инженерной безопасности зданий и сооружений / МЧС России. М. , 2003. 46 с.
4. Cherry S., Brady A.G. Determination of Structural Dynamic Properties by Statistical Analysis of Random Vibrations // Proceedings of Third World Conference on Earthquake Engineering. New Zealand, 1965. Volume II. Pp. 50-68.
5. Bishop R. E., Gladwell G. M. An investigation into the theory of resonance testing // Philosophical Transactions. 1963. Series A, Volume 225, A-1055. Pp. 241-280.
6. Динамические испытания строительных материалов, конструкций и сооружений. Труды ЦНИИС. М. , 2000. Выпуск № 202. 155 с.
7. Вибрационные испытания зданий / Под ред. Г. А. Шапиро. М. : Стройиздат, 1972. 159 с.
8. Мохов Б. А., Савин С. Н., Кабанцев О. В. К контролю состояния зданий в сейсмоопасных районах // Научно-технический сборник Минобороны. 1992. № 82. С. 10-14.
9. Савин С. Н., Ситников И. В., Титова Л. И., Чернов В. И. Инструментальное определение динамических характеристик зданий и первичная обработка информации // Научно-технический сборник Минобороны. № 82. 1992. С. 7-9.
10. Савин С. Н., Ситников И. В., Терехов В. М., Титова Л. И., Соколов В. А. Некоторые результаты инструментального обследования здания 101-й серии с использованием волновой микродинамики // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2000. Выпуск 6. С. 3-6.
11. Савин С. Н., Артемьев А. Н., Шевченко Н. И. Комплексный метод выявления скрытых дефектов и оценка надежности строительных конструкций // Зодчий. 2001. № 1. С. 76-78.
12. Савин С. Н., Ситников И. В., Привалов С. Ю. Результаты обследования конструкций бочарных сводов большого пролета с использованием метода свободных колебаний // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2001. Выпуск 6. С. 3-7.
13. Савин С. Н. Техническая диагностика прочностных характеристик зданий и сооружений на основе анализа форм их собственных колебаний / МО РФ. М. , 2006. 141 с.
14. Савин С. Н и др. Современные методы технической диагностики строительных конструкций зданий и сооружений. СПб. : РДК-принт, 2000. 127 с.

**Сергей Николаевич Савин, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. моб.: +7-911-220-49-92; эл. почта: savinsn@gmail.com

Опыт выявления дефектов и трещин в крупноразмерных резервуарах для хранения углеводородов

Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой, директор Балаковского института техники, технологии и управления А.А. Землянский*;
доцент О.С. Вертынский,
ГОУ ВПО Саратовский государственный технический университет

Ключевые слова: резервуары для хранения нефтепродуктов; комплексное обследование; дефекты; трещины; ультразвуковой дефектоскоп

В последние годы в мировой практике особое внимание уделяется проблеме повышения эксплуатационной надёжности стальных вертикальных резервуаров (РВС) для хранения нефти и нефтепродуктов. Это обусловлено тем, что за последние тридцать лет в Европе и Японии произошел ряд серьёзных аварий крупных резервуаров ёмкостью от 30 до 80 тыс. м^3, у которых толщина нижних поясов изменялась от 25 до 32 мм, а толщина окраек не превышала 16 мм [1,2,3,4].

После аварии в Японии резервуара ёмкостью 50 тыс. м^3 [5] были выполнены аналитические расчёты и необходимые эксперименты, показавшие, что напряжённо-деформированное состояние (НДС) вертикальной стенки и окраек в зоне уторного сварного шва с самого начала эксплуатации находилось в пластической стадии. Расчёты на малоцикловую усталость, произведённые японскими специалистами по методике Американского нефтяного института, показали, что при выявленном уровне НДС уторного шва указанный резервуар мог выдержать не более 40 циклов загружения. В рассмотренном случае за 9 месяцев эксплуатации обследуемый резервуар выдержал всего 18 полных циклов загружения и имел: нижний пояс толщиной 27 мм с окрайкой толщиной 12 мм, выполненный из высокопрочной стали марки HW50. Усталостная трещина возникла сразу в уторном шве и окрайке в зоне наибольших изгибающих напряжений и стала развиваться в двух направлениях: вдоль стенки резервуара в пределах 12,8 м и в радиальном направлении в окрайке в пределах 3 м. Аналогичные аварии произошли в Японии в резервуарах объёмом 38,65 и 80 тыс. м^3.

Одновременно в Европе произошли характерные аварии резервуаров объёмом от 30 до 50 тыс.м^3, у которых разрушения уторного шва достигли ещё более катастрофических размеров.

В работах В.В. Филиппова, В.А. Прохорова, С.В. Аргунова и Н.И. Буслаевой [6,7] проведён детальный анализ отказов и предаварийных ситуаций нефтеналивных резервуаров на нефтебазах республики САХА (Якутия). Так, в августе 1991 г. во время заполнения резервных резервуаров в п. Усть-Куйга последние получили значительные повреждения и вышли из строя. При этом во время аварии температура окружающей среды достигла +40°С, что привело к образованию трещин в уторных соединениях трёх резервуаров объёмом от 700 до 2000 м^3. Геодезическая съёмка, выполненная после аварии, установила, что максимальное значение разности отметок в пределах разрушенных уторных соединений составило более 294 мм.

В 1990 г. на предприятии «Якутскнефтепродукт» Нижне-Бестяхской нефтебазы было произведено обследование технического состояния более 20 резервуаров объёмом от 1000 до 3000 м^3 [6]. При этом в ходе сезонного оттаивания и промерзания грунтов РВС была выявлена максимальная разность осадок окраек по периметру днища от 102 до 258 мм, что также стало причиной возникновения серьёзных аварийных ситуаций.

Распределение отказов обследованных резервуаров на указанных предприятиях в зависимости от их местонахождения представлено на рис. 1.

Одновременно в указанных резервуарах было выявлено множество дефектов, трещин и непроваров сварных швов как в уторном соединении, так и в днище.

Детальный анализ результатов комплексных обследований РВС и материалов, представленных на рис. 1, свидетельствует о том, что наиболее часто предаварийные либо аварийные ситуации возникают в самом опасном и перегруженном участке – уторном соединении стенки с днищем. Последнее объясняется тем, что в уторной зоне имеет место сложно-

напряженное состояние, обусловленное наличием как кольцевых растягивающих усилий, так и меридиональных напряжений изгиба от краевых моментов.

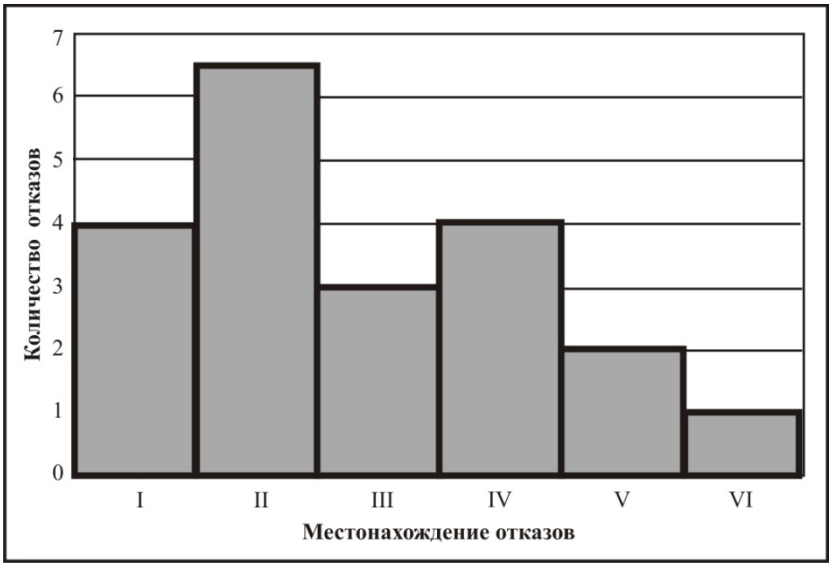


Рисунок 1. Зависимость отказов резервуаров от их местонахождения: I – отказы, расположенные в стенке; II – отказы, расположенные в уторных соединениях; III – отказы, расположенные в монтажных швах; IV – отказы, расположенные в патрубке; V – отказы, расположенные в днище; VI – отказы, расположенные в трубопроводе

Как показывает практика, именно в уторном соединении образование трещин может происходить по трём характерным направлениям, представленным на рис. 2.

Образование указанных дефектов и трещин в уторном соединении, по мнению автора, обусловлено:

- активными коррозионными процессами, происходящими в этой зоне из-за наличия подтоварной воды;
- малоцикловой усталостью металла в перегруженном сварном шве;
- наличием «остаточных» напряжений как в теле, так и в околошовной зоне сварного шва уторного соединения;
- возникновением «остаточных» напряжений непосредственно в вертикальной стенке резервуара в ходе формирования ее цилиндрической формы;
- возникновением сложнонапряжённого состояния вертикальной стенки в результате неравномерной осадки РВС;
- наличием высокого температурного градиента в вертикальной стенке из-за большого перепада температуры между хранимым нефтепродуктом и внешней средой;
- местной потерей устойчивости вертикальной стенки РВС как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях непосредственно в зоне уторного соединения.

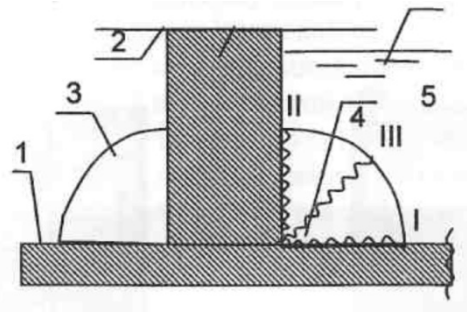


Рисунок 2. Схемы образования трещин в уторном соединении РВС: 1 – окрайка; 2 – вертикальная стенка; 3 – внешний сварной шов; 4 – внутренний шов; 5 – хранимый нефтепродукт; I – усталостная трещина первого рода; II – усталостная трещина второго рода; III – усталостная трещина третьего рода

Очень часто на практике возникает необходимость определения наличия трещин и расслоений в зоне внутреннего сварного шва уторного соединения вертикальной стенки и окраек при полностью заполненном нефтепродуктом резервуаре. Данная задача до последнего времени решалась с очень большими трудозатратами и только после полного опорожнения РВС от нефтепродукта с помощью различных традиционных методов [8,9,10,11,12]:

- метода проникающих сред;
- методов, основанных на использовании рентгено- и гаммаскопии;
- методов неразрушающей, ультразвуковой дефектоскопии;
- магнитно-порошковых методов;
- магнитографических методов.

Детальный анализ всех вышеуказанных методов позволил установить фактическую невозможность сколько-нибудь эффективного их использования для выявления трещинообразных дефектов внутренних сварных швов уторного соединения при полностью загруженном РВС.

Системный анализ поставленной задачи и всех существующих методов прямого и косвенного определения характерных трещин в указанном сварном шве исследуемого соединения позволил автору разработать нетрадиционный метод определения ожидаемых трещин. Метод основывается на использовании ультразвукового толщиномера модели УТ-93П по ТУ 25-7761.007-86 и разработанного автором модифицированного высокочувствительного магнитоупругого тестера, разрешающая способность которого превышает 0,1 МПа. Тестер применяется для оценки действующих и «остаточных» напряжений в ферромагнитных материалах [13,14].

Выполненные автором модельные эксперименты и натурные исследования позволили разработать детальный сценарий и эффективную методику выявления характерных трещин **I, II, и III рода** (рис. 2) в исследуемом сварном шве.

Методика с использованием ультразвукового толщиномера УТ-93П для определения характерных горизонтальных трещин **I рода** предполагает три этапа. На первом этапе выполняется плановая тарировка указанного прибора. На втором этапе окрайка в зоне нахождения внутреннего сварного шва должна зачищаться снизу от коррозии для обеспечения акустического контакта датчика прибора УТ-93П и металла окрайки. Затем датчик устанавливается снизу на защищённое место окрайки непосредственно под внутренним сварным швом с обеспечением полного акустического контакта, как показано на рис. 3, а, б.

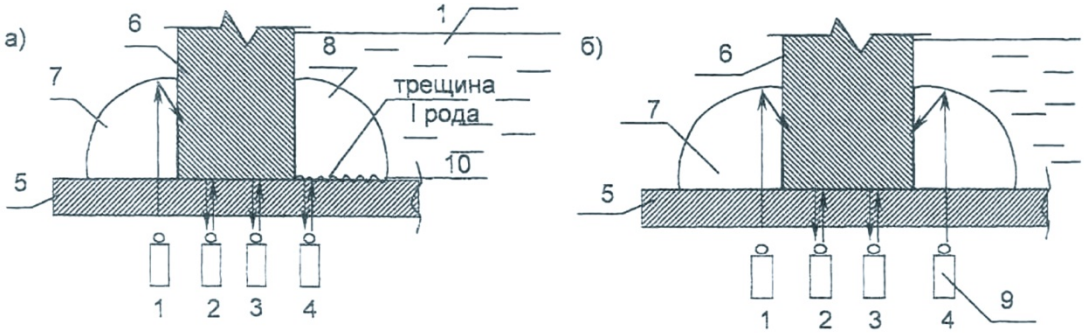


Рисунок 3. Схема определения характерной горизонтальной трещины 1 рода во внутреннем сварном шве: а – схема прохождения ультразвука при наличии горизонтальной трещины в сварном шве; б – схема прохождения ультразвука при отсутствии горизонтальной трещины в сварном шве; 1, 2, 3, 4 – зоны установки акустического датчика; 5 – окрайка; 6 – вертикальная стенка; 7 – внешний сварной шов; 8 – внутренний сварной шов; 9 – акустический датчик; 10 – горизонтальная трещина I рода

В случае наличия между окрайкой и вертикальной стенкой или внутренним сварным швом любой микротрещины или микрорасслоения посланный ультразвуковой сигнал отражается от верхней плоскопараллельной поверхности окрайки и вновь возвращается в тот же приёмно-передающий датчик, так как ультразвуковой толщиномер работает с одним и тем же универсальным датчиком в режиме эхолокации, как показано на рис. 3а, при установке датчика в зону 2, 3 и 4. При этом на цифровом табло прибора будет высвечиваться только толщина окрайки с точностью 0,1 мм, что является ярким признаком наличия горизонтальной микротрещины в исследуемом сварном шве.

При установке датчика в зону 1 на рис. 3а и в зону 4 на рис. 3б, когда горизонтальная трещина I **рода** в сварном шве отсутствует, ультразвук без каких-либо потерь пройдёт через окрайку непосредственно в сварной шов и, дойдя до его верхней поверхности, отразится от неё под некоторым углом, синхронным углу её наклона к горизонту, что не позволит указанному сигналу вновь вернуться в датчик, что в данном случае также является наглядным и косвенным признаком отсутствия в сварном шве ожидаемой горизонтальной трещины **I рода.**

Вертикальная трещина **II рода** может быть выявлена подобным же образом, но с обязательным созданием на внешней поверхности сварного шва уторного соединения специальной рабочей площадки, плоскопараллельной вертикальной поверхности стенки, для установки акустического датчика, как показано на рис. 4 а, б. При этом все остальные измерения могут выполняться практически идентично вышеописанной процедуре.

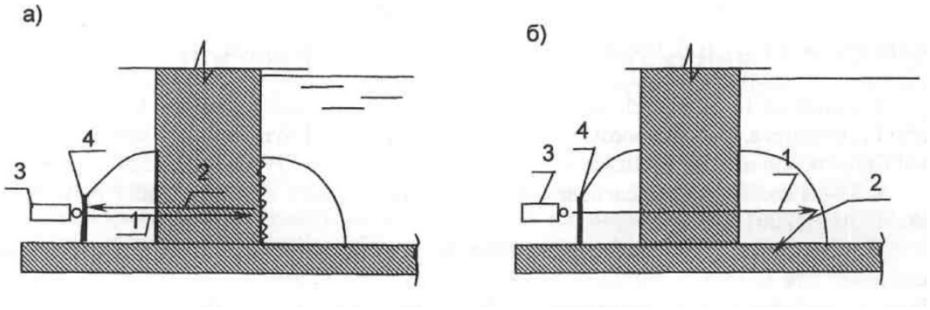


Рисунок 4. Схема определения вертикальных трещин II рода:
1 – посланный сигнал; 2 – отражённый сигнал; 3 – акустический датчик;
4 – искусственно созданная рабочая площадка для установки датчика прибора УТ-93П

Усталостную трещину **III рода,** расположенную под углом 45°, можно обнаружить только на основе создания на внешней поверхности сварного шва ещё одной специальной рабочей площадки, плоскопараллельной поверхности ожидаемой трещины, под углом 45° к горизонту, как показано на рис. 7 а, б. В этом случае при наличии трещины **III рода** отражённый сигнал будет принят, а в случае отсутствия трещины указанный сигнал будет теряться, что подтверждают и все выполненные модельные и натурные эксперименты.

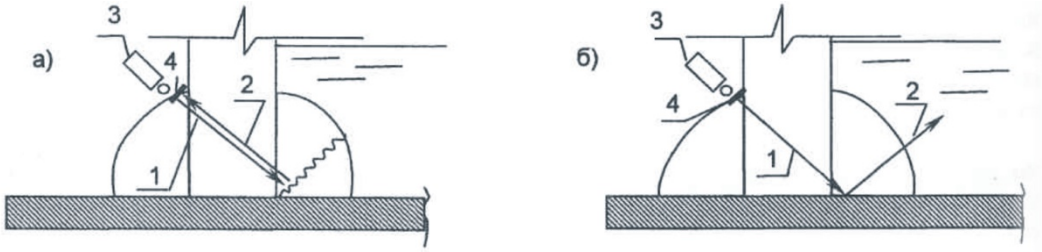


Рисунок 5. Схема определения характерных трещин III рода:
1 – посланный сигнал; 2 – отражённый сигнал; 3 – акустический датчик;
4 – искусственно созданная рабочая площадка для установки датчика прибора УТ-93П

Кроме отмеченного, с целью косвенного определения момента появления трещин **I, II, и III рода** в сварном шве уторного соединения автор предлагает применить магнитоупругий тестер. Он позволяет организовать активный мониторинг НДС вертикальной стенки в двух главных направлениях, устанавливая рабочие датчики на вертикальную стенку с максимальным приближением к уторному шву, соответственно, в горизонтальном и меридиональном направлениях. В результате, при постоянном уровне хранимого нефтепродукта в РВС и внезапном появлении во внутреннем сварном шве каких-либо усталостных трещин в контролируемой вертикальной стенке произойдет резкое увеличение кольцевых напряжений и синхронное уменьшение меридиональных напряжений, что будет зафиксировано с очень высокой точностью разработанной и апробированной магнитоупругой системой измерения [14].

В целом предложенная система активного мониторинга НДС резервуара и эффективная методика обнаружения усталостных трещин во внутреннем сварном шве уторного соединения позволит на практике значительно повысить общую эксплуатационную надёжность таких экологически опасных объектов как нефтеналивные резервуары большого объёма, а также резко уменьшить все затраты на плановые и внеплановые натурные обследования РВС без какого-либо удаления из них хранимых нефтепродуктов.

Выводы:

- разработанный авторами нетрадиционный метод определения ожидаемых трещин в уторном узле крупноразмерных резервуаров для хранения углеводородов на базе использования ультразвукового толщиномера модели УТ-93П и высокочувствительного магнитоупругого тестера позволяет на практике выявлять с высокой разрешающей способностью трещины и дефекты **I, II** и **III** рода;
- предложенный метод позволяет уменьшить финансовые, временные и технологические затраты на плановые и внеплановые натурные обследования РВС без какого-либо удаления из резервуаров хранимых нефтепродуктов;
- использование вышеописанного метода позволит на практике полностью предотвратить возникновение каких-либо предаварийных или аварийных ситуаций с экологически опасными объектами, к которым относятся все крупноразмерные резервуары для хранения углеводородов.

Литература

1. Беляев Б. Ф., Горицкий В .М., Кулахметьев Р. Р., Шнейдеров Г. Р.. Коррозионная повреждаемость стальных цилиндрических резервуаров для хранения нефти // Промышленное и гражданское строительство. 1998. № 5. С. 33–36.
2. Иванов С. Н., Голубева Н. В., Плаксин Ю. В. Влияние технологических несовершенств на безопасную эксплуатацию резервуаров // Промышленное и гражданское строительство. 1998. №5. С. 27–28.
3. Кондаков Г. П., Кузнецов В. В., Лукиенко М.И. Анализ причин аварий вертикальных цилиндрических резервуаров // Трубопроводный транспорт. 1994. № 5. С. 6–7.
4. Кузнецов В. В., Кондаков Г. П. Проблемы отечественного резервуаростроения // Промышленное и гражданское строительство. 1995. №5. С. 41–45.
5. Авария большого резервуара в Японии (перевод с английского) // Хайкан Гидзюцу. 1975. Т.8. №5. С. 128–142.
6. Филиппов В. В., Прохоров В. А., Аргунов С. В., Буслаева И. И. Техническое состояние резервуаров для хранения нефтепродуктов объединения «Якутнефтепродукт» // Известия вузов. Строительство. 1993. №7-8. С. 13–16.
7. Buslajeva I. I., Prohorov V. A.. Research of Deformation of Tank Foundation under Conditions of the North. // Geocryologic Problem of Construction in Eastern Russia and Northern China: Proceedings of International Symposium. Chita, 1998. Pp. 219–224.
8. Землянский А. А. Обследование и испытание зданий и сооружений. М. : АСВ, 2001. 240 с.
9. РД 08-95-95. Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов. М. : ПИО ОБТ, 2001. 39 с.
10. РД 39-0147103-385-87. Правила технической эксплуатации резервуаров магистральных трубопроводов. Уфа : ВНИИСПТнефть, 1988. 282 с.
11. РД 39-30-1284-85. Руководство по обследованию и дефектоскопии вертикальных стальных резервуаров. Уфа : ВНИИСПТнефть, 1986. 250 с.
12. Руководство по обследованию и дефектоскопии металлических резервуаров вместимостью от 100 до 50000 м^3. Астрахань : Изд-во ЦНИЛ Госкомнефтепродукта РСФСР, 1990. 145 с.
13. Землянский А. А. Вопросы экспертизы технического состояния эксплуатируемых резервуаров для нефтепродуктов // Строительство и недвижимость, судебная экспертиза и оценка: материалы II Междунар. конф. Прага, 2004. С. 30–33.
14. Землянский А. А. Мониторинг и управление надёжностью зданий и сооружений различного назначения // Промышленное и гражданское строительство. 2004. № 9. С. 39.

**Анатолий Андреевич Землянский, г. Балаково, Россия*

Тел. раб.: +7(927)225-86-92; эл. почта: director@bittu.org.ru

Оценка технического состояния строительных конструкций зданий на основе многоуровневого вероятностного анализа

К.т.н., профессор В.А. Соколов*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: техническое состояние; вероятностный аппарат; многоуровневое диагностирование; методы теории информации; информационная энтропия; иерархическая структура диагностирования; прямой ход; обратный ход

Для анализа технического состояния, а также для определения категорий технического состояния элементов зданий в соответствии с [1,2] предложен подход, основанный на теоретическом аппарате технической диагностики, использующем вероятностные методы распознавания состояний сложных технических систем [3]. Диагностирование выполняется статистическим методом с применением обобщенной формулы Байеса [4-9]:

$$P(S_i / K^*) = \frac{P(S_i)P(K^* / S_i)}{\sum_{s=1}^{n} P(S_S)P(K^* / S_S)}.$$

После вычисления апостериорных вероятностей состояний $P(S_i/K^*)$ для каждого элемента по указанной зависимости осуществляется анализ полученных результатов с использованием аппарата теории информации, в частности, с использованием понятий информационной энтропии [4,5,10,11]. На этой основе строится многоуровневая модель диагностирования. Такой подход к оценке технического состояния зданий предлагается впервые.

В качестве примера рассматривается здание старой городской застройки, состоящее из следующих основных конструктивных систем: фундаменты, наружные стены, перекрытия, крыша. Для проведения вероятностного анализа технического состояния здания его элементы, подсистемы и системы со своими диагностическими параметрами можно представить в виде многоуровневой иерархической схемы – дерева диагнозов (рис. 1).

В данной статье рассмотрены результаты вероятностного анализа состояний только одной из конструктивных систем – системы междуэтажных перекрытий и их элементов. Эта ветвь дерева диагнозов выделена из общей схемы и отдельно представлена на рис. 2. Как видно, показаны два междуэтажных перекрытия, имеющих различное конструктивное исполнение: железобетонное монолитное, выполненное по схеме балочной клетки, и перекрытие по деревянным и стальным балкам с деревянным заполнением.

Монолитное железобетонное перекрытие состоит из главных балок G_k, второстепенных балок W_k, плитных участков F_k и колонн L_k, которые рассматриваются как его элементы-подсистемы. На рис. 3 схематично показан пример раскладки этих элементов. Как видно из рис. 3, в состав перекрытия входят четыре подсистемы: подсистема «главные балки» (g = 3), подсистема «второстепенные балки» (w = 22), подсистема «плитные участки» (f = 24) и подсистема «колонны» (l = 2). Далее это перекрытие будет обозначено как объединенная система **«перекрытие *U*(*GWFL*)»**.

Перекрытие по деревянным и стальным конструкциям состоит из стальных двутавровых балок D_k, деревянных балок B_k, деревянных элементов заполнения Z_k и стальных колонн L_k. Все они тоже рассматриваются как элементы-подсистемы перекрытия. На рис. 4 схематично показан пример их раскладки. Здесь в состав перекрытия также входят четыре подсистемы: подсистема «стальные балки» (d = 3), подсистема «деревянные балки» (b = 22), подсистема «элементы заполнения» (z = 1) и подсистема «колонны» (l = 2). Это перекрытие в дальнейшем изложении будет обозначено как объединенная система **«перекрытие *U*(*DBZL*)»**.

Процедура построения решения для диагностирования состояний подсистем **«перекрытия *U*(*GWFL*)»** рассмотрена в статье [7]. Результаты диагностирования в общем виде представлены в табличной форме (таблица 1).

Окончательные зависимости для распределения вероятностей состояния системы **«перекрытие *U*(*GWFL*)»** записаны в следующем виде [6,7]:

$$
\begin{aligned}
P_1(U)/K_u^* &= \sum_{k=1}^{u} P(U_{k1}/K_u^*)P(U_k) = P(U_{11}/K_u^*)P(V_1) + \ldots + P(U_{41}/K_u^*)P(V_4);\\
P_2(U)/K_u^* &= \sum_{k=1}^{u} P(U_{k2}/K_u^*)P(U_k) = P(U_{12}/K_u^*)P(V_1) + \ldots + P(U_{42}/K_u^*)P(V_4);\\
P_3(U)/K_u^* &= \sum_{k=1}^{u} P(U_{k3}/K_u^*)P(U_k) = P(U_{13}/K_u^*)P(V_1) + \ldots + P(U_{43}/K_u^*)P(V_4);\\
P_4(U)/K_u^* &= \sum_{k=1}^{u} P(U_{k4}/K_u^*)P(U_k) = P(U_{14}/K_u^*)P(V_1) + \ldots + P(U_{44}/K_u^*)P(V_4);\\
P_5(U)/K_u^* &= \sum_{k=1}^{u} P(U_{k5}/K_u^*)P(U_k) = P(U_{15}/K_u^*)P(V_1) + \ldots + P(U_{45}/K_u^*)P(V_4).
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

Таблица 1. Результаты диагностирования для системы «перекрытие U(GWFL)»

Подсистемы	$P_1(U_k)$	$P_2(U_k)$	$P_3(U_k)$	$P_4(U_k)$	$P_5(U_k)$	$H(U_k)$	$V(U_k)$	$P(V_k)$
Главные балки	$P_1(G_k)$	$P_2(G_k)$	$P_3(G_k)$	$P_4(G_k)$	$P_5(G_k)$	$H(G_1G_2...G_k)$	$V(G_1G_2...G_k)$	$P(V_g)$
Второстепенные балки	$P_1(W_k)$	$P_2(W_k)$	$P_3(W_k)$	$P_4(W_k)$	$P_5(W_k)$	$H(W_1W_2...W_k)$	$V(W_1W_2...W_k)$	$P(V_w)$
Плитные участки	$P_1(F_k)$	$P_2(F_k)$	$P_3(F_k)$	$P_4(F_k)$	$P_5(F_k)$	$H(F_1F_2...F_k)$	$V(F_1F_2...F_k)$	$P(V_f)$
Колонны	$P_1(L_k)$	$P_2(L_k)$	$P_3(L_k)$	$P_4(L_k)$	$P_5(L_k)$	$H(L_1L_2...L_k)$	$V(L_1L_2...L_k)$	$P(V_l)$

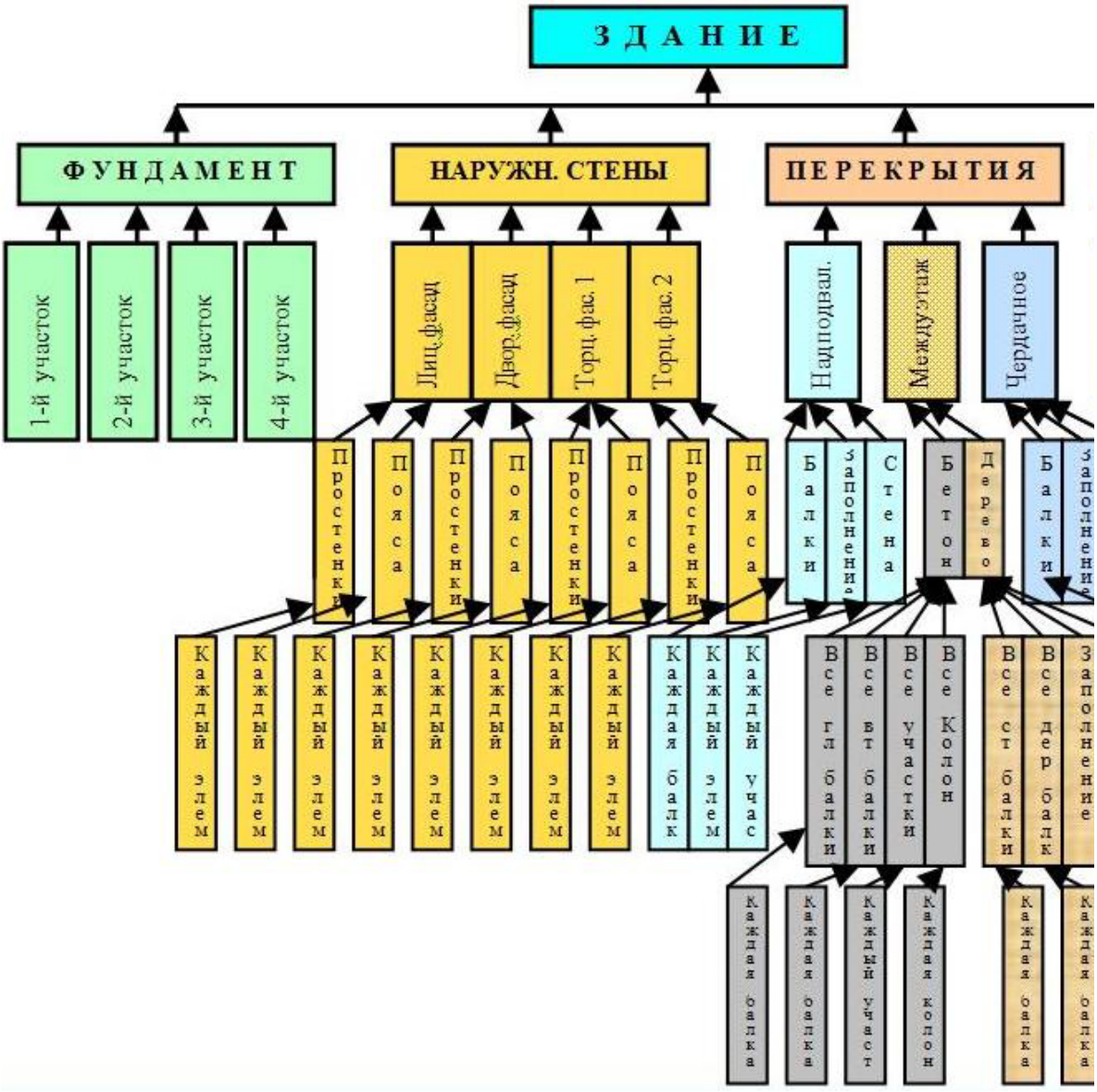


Рисунок 1. Диагностическое дерево

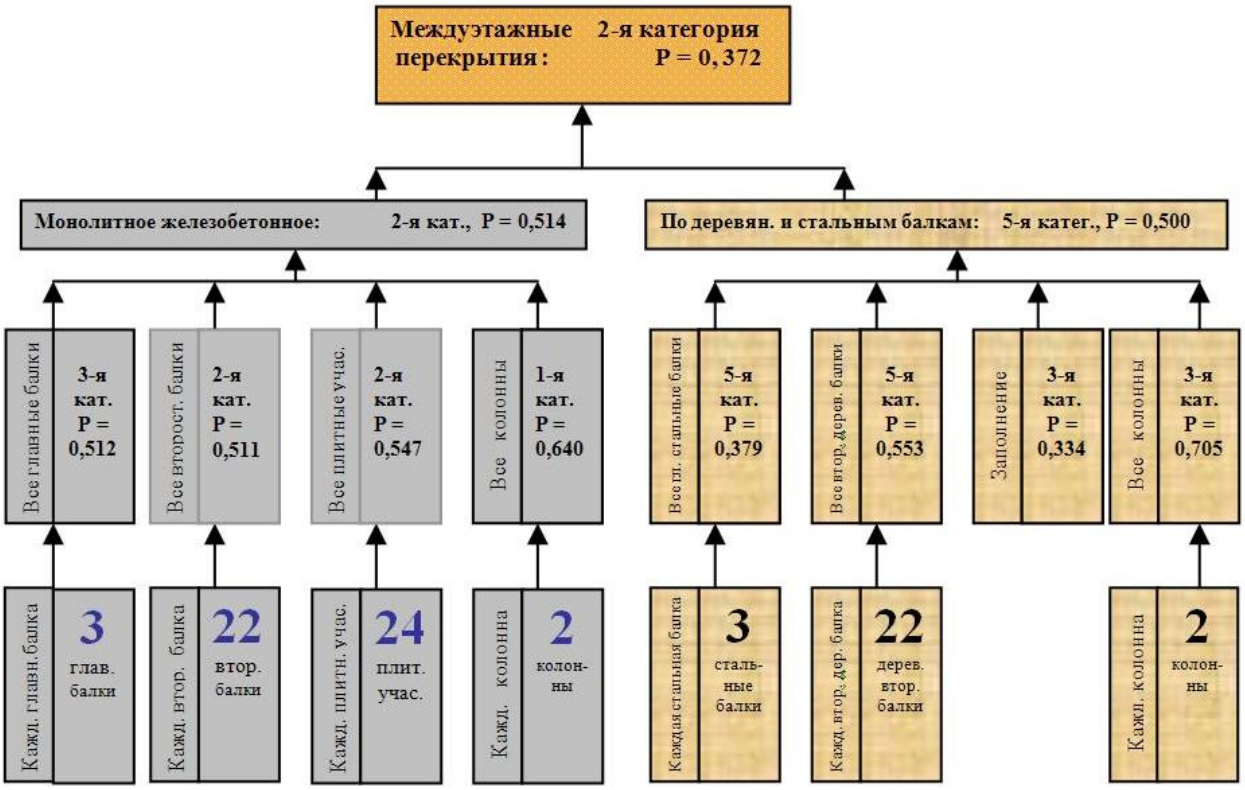


Рисунок 2. Часть диагностического дерева для конструктивной системы «междуэтажные перекрытия»

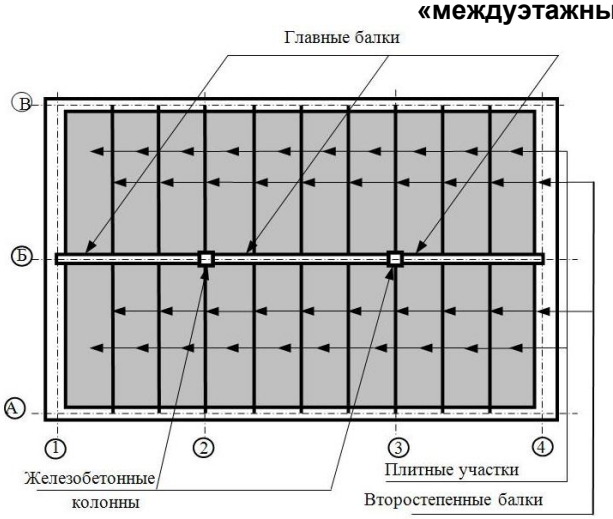


Рисунок 3. Схема раскладки балок монолитного железобетонного перекрытия

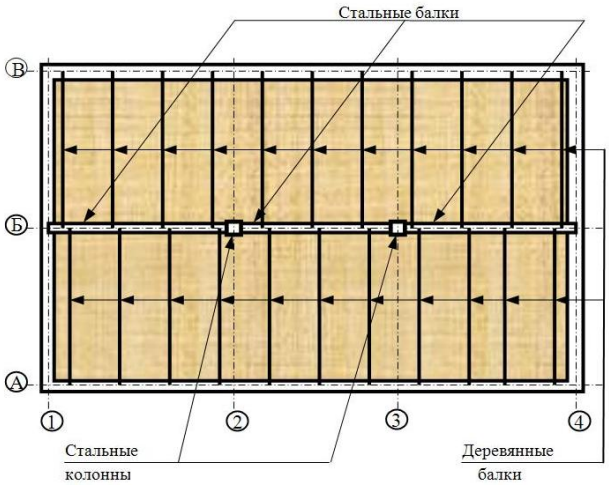


Рисунок 4. Схема раскладки элементов перекрытия по стальным и деревянным балкам

В статье [7] для этого перекрытия в качестве примера приведены численные результаты вероятностного анализа, основанные на матрицах диагнозов, построенных для его подсистем. В данной статье в численные значения внесены некоторые изменения, т. к. рассмотрен другой численный пример. Изменения коснулись второстепенных балок и плитных участков. Значения расчетных вероятностных параметров с учетом изменений сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Численные значения вероятностных параметров

Подсистемы	$P(U_{k1})$	$P(U_{k2})$	$P(U_{k3})$	$P(U_{k4})$	$P(U_{k5})$	$H(U_k)$	$V(U_k)$	$P(V_k)$
Главные балки	0,144	0,285	0,512	0,060	0,0006	1,372	0,728	0,059
Второстепенные балки	0,377	0,511	0,105	0,0074	0,00004	8,20	7,2	0,444
Плитные участки	0,165	0,547	0,249	0,039	0,00025	9,12	7,68	0,474
Колонны	0,640	0,218	0,089	0,049	0,0043	0,796	0,604	0,049

По данным таблицы 2 на основе предложенной в [6,7] методики энтропия состояний системы **«перекрытие *U*(*GWFL*)»** определена как сумма энтропий подсистем, составляющих это перекрытие:

$$H(U_k) = \sum_{k=1}^{u} H(U_k) = H(U_1) + H(U_2) + H(U_3) + H(U_4) = 19,50,$$

затем вычислена степень определенности, или количество внесенной информации (колонка 8 таблицы 2):

$$V(U_k) = \sum_{k=1}^{u} V(U_k) = V(U_1) + V(U_2) + V(U_3) + V(U_4) = 16,21$$

и вероятности степени определенности (колонка 9 таблицы 2):

$P(V_1) = V(U_1)/V(U_k) = 0,728/16,21 = 0,059,$

$P(V_2) = V(U_2)/V(U_k) = 7,20/16,21 = 0,444,$

$P(V_3) = V(U_3)/V(U_k) = 7,68/16,21 = 0,474,$

$P(V_4) = V(U_4)/V(U_k) = 0,604/16,21 = 0,049.$

Тогда для перекрытия в целом в соответствии с (1) получен следующий ряд численных значений апостериорных вероятностей состояний $P_i(U)/K_u^*$:

$$P_1(U)/K_u^* = 0,285;\quad P_2(U)/K_u^* = \underline{0,514};\quad P_3(U)/K_u^* = 0,199;$$

$$P_4(U)/K_u^* = 0,028;\quad P_5(U)/K_u^* = 0,00038.$$

Процедура построения решения и численные результаты при диагностировании состояний подсистем деревянного **перекрытия *U*(*DBZL*)** на основе построенных для них диагностических матриц подробно рассмотрены в статье [8]. Результаты также сведены в аналогичную таблицу (таблица 3).

Таблица 3. Результаты диагностирования для системы «перекрытие U(DBZH)»

Подсистемы	$P_1(U_k)$	$P_2(U_k)$	$P_3(U_k)$	$P_4(U_k)$	$P_5(U_k)$	$H(U_k)$	$V(U_k)$	$P(V_k)$
Стальные балки	$P_1(D_k)$	$P_2(D_k)$	$P_3(D_k)$	$P_4(D_k)$	$P_5(D_k)$	$H(D_1D_2...D_k)$	$V(D_1D_2...D_k)$	$P(V_d)$
Деревянные балки	$P_1(B_k)$	$P_2(B_k)$	$P_3(B_k)$	$P_4(B_k)$	$P_5(B_k)$	$H(B_1B_2...B_k)$	$V(B_1B_2...B_k)$	$P(V_b)$
Элементы заполнения	$P_1(Z_k)$	$P_2(Z_k)$	$P_3(Z_k)$	$P_4(Z_k)$	$P_5(Z_k)$	$H(Z_1Z_2...Z_k)$	$V(Z_1Z_2...Z_k)$	$P(V_z)$
Колонны	$P_1(H_k)$	$P_2(H_k)$	$P_3(H_k)$	$P_4(H_k)$	$P_5(H_k)$	$H(H_1H_2...H_k)$	$V(H_1H_2...H_k)$	$P(V_h)$

Численные же значения этих параметров представлены в таблице 4. По сравнению с примером, рассмотренным в [8], здесь также имеют место некоторые численные изменения.

Таблица 4. Численные значения вероятностных параметров «перекрытие U(DBZL)»

Подсистемы	$P(U_{k1})$	$P(U_{k2})$	$P(U_{k3})$	$P(U_{k4})$	$P(U_{k5})$	$H(U_k)$	$V(U_k)$	$P(V_k)$
Стальные балки	0,013	0,064	0,212	0,332	0,379	2,028	0,578	0,078
Деревянные балки	0,015	0,047	0,135	0,247	0,553	8,39	6,26	0,849
Элементы заполнения	0,317	0,334	0,219	0,109	0,020	0,600	0,063	0,009
Колонны	0,705	0,205	0,057	0,030	0,003	0,796	0,464	0,063

По данным этой таблицы вычислена энтропия состояний системы:

$$H(U_k) = \sum_{k=1}^{u} H(U_k) = H(U_1) + H(U_2) + H(U_3) + H(U_4) = 11,82,$$

а затем степень определенности (колонка 8 таблицы 4):

$$V(U_k) = \sum_{k=1}^{u} V(U_k) = V(U_1) + V(U_2) + V(U_3) + V(U_4) = 7,37.$$

Вероятности степени определенности в последней колонке таблицы 4 вычислены по формуле $P(V_k) = V(U_k)/V(DBZL)$.

Тогда для этого перекрытия ряд численных значений апостериорных вероятностей состояний $P_i(U)/K_u^*$ будет иметь следующий вид [8]:

$$P_1(U)/K_u^* = 0,061;\ \ P_2(U)/K_u^* = 0,061;\ \ P_3(U)/K_u^* = 0,137;$$

$$P_4(U)/K_u^* = 0,238;\ \ P_5(U)/K_u^* = \underline{0,500}.$$

Таким образом, для двух систем – **«перекрытие *U*(*GWFL*)»** и **«перекрытие *U*(*DBZL*)»** – получены вероятностные параметры, с помощью которых можно провести анализ технического состояния конструктивной системы следующего уровня – **«междуэтажные перекрытия *MU*»** (рис. 2). При этом вероятности степени определенности вычисляются следующим образом:

$$P(V_1) = V(U_1)/V(U_k) = 16,21 / 23,58 = 0,687,$$

$$P(V_2) = V(U_2)/V(U_k) = 7,37 / 23,58 = 0,313.$$

Результаты расчетов также удобно свести в аналогичную таблицу (таблица 5).

Таблица 5. Численные значения вероятностных параметров для системы «междуэтажные перекрытия MU»

Перекрытия	$P(U_{k1})$	$P(U_{k2})$	$P(U_{k3})$	$P(U_{k4})$	$P(U_{k5})$	$H(U_k)$	$V(U_k)$	$P(V_k)$
***U*(*GWFL*)**	0,285	0,514	0,199	0,028	0,00038	19,50	16,21	0,687
***U*(*DBZL*)**	0,061	0,061	0,137	0,238	0,500	11,82	7,37	0,313

Для дальнейшего уровневого анализа можно определить энтропию состояний системы **«междуэтажные перекрытия *MU*»**, учитывая результаты диагностирования всех элементов обоих перекрытий:

$$H(MU_k) = \sum_{k=1}^{u} H(U_k) = H\left[U(GWFL)\right] + H\left[U(DBZL)\right] = 31,32.$$

Степень определенности (количество внесенной информации):

$$V(MU_k) = \sum_{k=1}^{u} V(U_k) = V\left[U(GWFL)\right] + V\left[U(DBZL)\right] = 23,58.$$

Тогда вероятности состояний объединенной системы **«междуэтажные перекрытия *MU*»** предлагается вычислить по зависимостям, аналогичным зависимостям (1):

$$\begin{aligned}
P_1(MU)/K_u^* &= \sum_{k=1}^{u} P(U_{k1}/K_u^*)P(V_k) = P(U_{11}/K_u^*)P(V_1) + P(U_{21}/K_u^*)P(V_2) = 0,215;\\
P_2(MU)/K_u^* &= \sum_{k=1}^{u} P(U_{k2}/K_u^*)P(V_k) = P(U_{12}/K_u^*)P(V_1) + P(U_{22}/K_u^*)P(V_2) = \underline{0,372};\\
P_3(MU)/K_u^* &= \sum_{k=1}^{u} P(U_{k3}/K_u^*)P(V_k) = P(U_{13}/K_u^*)P(V_1) + P(U_{23}/K_u^*)P(V_2) = 0,180;\\
P_4(MU)/K_u^* &= \sum_{k=1}^{u} P(U_{k4}/K_u^*)P(V_k) = P(U_{14}/K_u^*)P(V_1) + P(U_{24}/K_u^*)P(V_2) = 0,094;\\
P_5(MU)/K_u^* &= \sum_{k=1}^{u} P(U_{k5}/K_u^*)P(V_k) = P(U_{15}/K_u^*)P(V_1) + P(U_{25}/K_u^*)P(V_2) = 0,157.
\end{aligned} \qquad (2)$$

Как видно по результатам выполненных расчетов, техническое состояние системы **«междуэтажные перекрытия *MU*»** в данном примере с вероятностью $P(MU)/K_u^* = 0{,}372$ может быть отнесено к второй работоспособной категории. При этом с помощью параметра $V(MU_k)$ в дальнейшем уровневом построении решения оценивается вклад состояния этой системы в состояние системы следующего уровня – здания в целом (рис. 1). Это **прямой ход** диагностирования, позволяющий в итоге определить техническое состояние и категорию для всего здания, а также оценить на этой основе степень и глубину инженерного вмешательства в систему и всех ее подсистем при планировании мероприятий по дальнейшей технической эксплуатации здания.

Интересен **обратный ход**. Его суть в следующем: обратный ход позволяет определить информационную долю (вклад) состояния каждого конструктивного элемента каждой подсистемы в общей информации о состоянии системы высшего уровня – здания в целом. Представляется, что результаты прохождения по иерархической структуре в обратном направлении могут дополнить полученную выше чисто техническую информацию о состоянии объекта еще и стоимостными параметрами.

В данном случае предлагается проделать обратный ход следующим образом. Предположим, что рассматриваемый в данном примере уровень диагностирования **«междуэтажные перекрытия *MU*»** является высшим. Тогда, как видно из таблицы 5, доля внесенной информации о состоянии системы **«перекрытие *U*(*GWFL*)»** (монолитное железобетонное) в общей информации о состоянии системы **«междуэтажные перекрытия *MU*»** (условный высший уровень) составляет величину $P(V_1) = 0{,}687$, а системы **«перекрытие *U*(*DBZL*)»** – величину $P(V_2) = 0{,}313$ (см. колонку 9 таблицы 5). Очевидно, что $P(V_1) + P(V_2) = 1{,}0$.

Тогда, основываясь на данных таблицы 2, доля (вклад) состояния подсистемы «главные балки $G_1G_2G_3$» в состояние системы **«перекрытие *U*(*GWFL*)»** определится соотношением 0,687·0,059 = 0,0405 (4,05 %). Далее, в соответствии с данными таблицы 5 в [7], доля каждого элемента подсистемы «главные балки $G_1G_2G_3$» будет представлена следующим рядом значений: для балки G_1 0,0405·0,470 = 0,0191 (1,91%), для балки G_2 0,0405·0,255 = 0,0103 (1,03 %), для балки G_3 0,0405·0,275 = 0,0111 (1,11%).

Доля (вклад) состояния подсистемы «второстепенные балки $W_1W_2W_3\ldots W_{22}$» составляет величину 0,687·0,444 = 0,305 (30,5 %) и в соответствии с таблицей 6 в [7] вклад состояний каждой из 22 второстепенных балок определится диапазоном 0,0062 – 0,0176 (0,62 % – 1,76 %).

Для подсистемы «плитные участки F_1 $F_2F_3\ldots F_{24}$» 0,687·0,474 = 0,326 (32,6 %), а доля каждого плитного участка (таблица 7 в [7]) будет находится в пределах от 0,0059 (0,59 %) до 0,0179 (1,79 %).

Для подсистемы «колонны L_1L_2» 0,687·0,049 = 0,034 (3,4%), и доля каждой из них определится значениями 0,0075 и 0,0265(0,75 % и 2,65 %, таблица 8 в [7]).

Аналогичное распределение долей состояний конструктивных элементов можно получить и для перекрытия по стальным и деревянным балкам [8], т.е. для конструктивной системы **«перекрытие *U*(*DBZL*)»**.

Представляется, что это долевое распределение состояний может стать достаточно аргументированным обоснованием при выполнении расчетов физического износа каждого конструктивного элемента каждого уровня диагностирования и объекта в целом. Не исключено, что это распределение может быть использовано и в методиках стоимостных расчетов строительной части объектов недвижимости.

Заключение. Выводы по результатам выполненных расчетов можно сформулировать следующим образом:

1. **Прямой ход** диагностирования на основе уровневой постановки задачи позволяет определить техническое состояние и категорию для каждого элемента каждого уровня иерархической структуры, а также для всего здания. Это, в свою очередь, позволяет оценить степень и глубину инженерного вмешательства в систему и ее подсистемы при планировании мероприятий по дальнейшей технической эксплуатации здания.

2. **Обратный ход** дает возможность определить информационную долю (вклад) состояния каждого конструктивного элемента каждой подсистемы в общей информации о состоянии системы высшего уровня – здания в целом. Представляется, что долевое распределение состояний может стать достаточно аргументированным обоснованием при выполнении расчетов физического износа [12] для каждого конструктивного элемента на каждом уровне диагностирования и для объекта в целом.

3. Кроме того, показано, что результаты прохождения по иерархической структуре в обратном направлении могут дополнить полученную чисто техническую информацию о состоянии объекта еще и стоимостными параметрами. Не исключено, что представленное в рамках обратного хода долевое распределение может быть положено в основу стоимостных расчетов в методиках оценки объектов недвижимости в части строительных конструкций.

Литература

1. Болотин В. В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М. : Стройиздат, 1971. 255 с.
2. Скоробогатов С. М. Принцип информационной энтропии в механике разрушения инженерных сооружений и горных пластов. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2000. 419 с.
3. Гаврилова Е. Л., Уткин В. С. Определение физического износа конструкций, оценка их надёжности и долговечности // Строительный комплекс 1998: Тезисы доклада научно-технической конференции. Н. Новгород , 1998. С. 77-78.
4. Соколов В. А. Оценка технического состояния элементов строительных систем с использованием вероятностных методов распознавания // Дефекты зданий и сооружений: материалы XIV научно-методической конференции №14. СПб. : Изд-во ВИТИ, 2010. С. 54–63.
5. Соколов В. А. Вероятностный метод оценки технического состояния конструкций железобетонного монолитного перекрытия зданий старой городской застройки // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 4. С. 49–58.
6. Соколов В. А. Вероятностный анализ технического состояния конструкций зданий старой городской застройки // Современные строительные конструкции из металла, дерева и пластмасс: Сборник трудов Международного симпозиума №14, часть 1. Одесса : Внешрекламсервис, 2010. С. 242–250.
7. Соколов В. А. Многоуровневый вероятностный анализ технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений // Дефекты зданий и сооружений: материалы XV научно-методической конференции №15. СПб. : Изд-во ВИТИ, 2011. С. 54–63.
8. Gurov S. V., Utkin L. V. Reliability optimization of systems with periodic modifications in the probability and possibility context // Microelectronics and Reliability. 1997. 37(5). Pp. 801-808.
9. Engelund S., Sorensen J., Sorensen B. Evaluation of Repair and Maintenance Strategies for Concrete Coastal Bridges on a Probabilistic Basis. ACJ Materials Journal. 1999. v 96. №2. Pp. 160–166.
10. Биргер И. А. Техническая диагностика. М. : Машиностроение, 1978. 240 с.
11. Соколов В. А. Построение решения для оценки технического состояния конструктивных систем зданий и сооружений с использованием вероятностных методов распознавания // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 6. С. 48–57.
12. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетики. М. : Изд-во иностранной литературы, 1963. 830 с.

** Владимир Алексеевич Соколов, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7(812)535-16-32; эл. почта: sva0808@rambler.ru

Модель идентификации и прогноза дефектов строительной конструкции на основе результатов ее обследования

Старший преподаватель Т.Н. Солдатенко*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: обследование строительных конструкций; функция принадлежности; нечеткая логика; лингвистические переменные; причины повреждений

Введение

Характерной особенностью современного состояния объектов капитального строительства страны является большая доля зданий и сооружений со значительным уровнем износа [1]. Например, на конец 90-х годов в Санкт-Петербурге доля всех видов недвижимости с неудовлетворительным уровнем технического состояния составляла более 25%, а доля объектов, уровень которых приближается к неудовлетворительному, превышал 40% (рис. 1) [2].

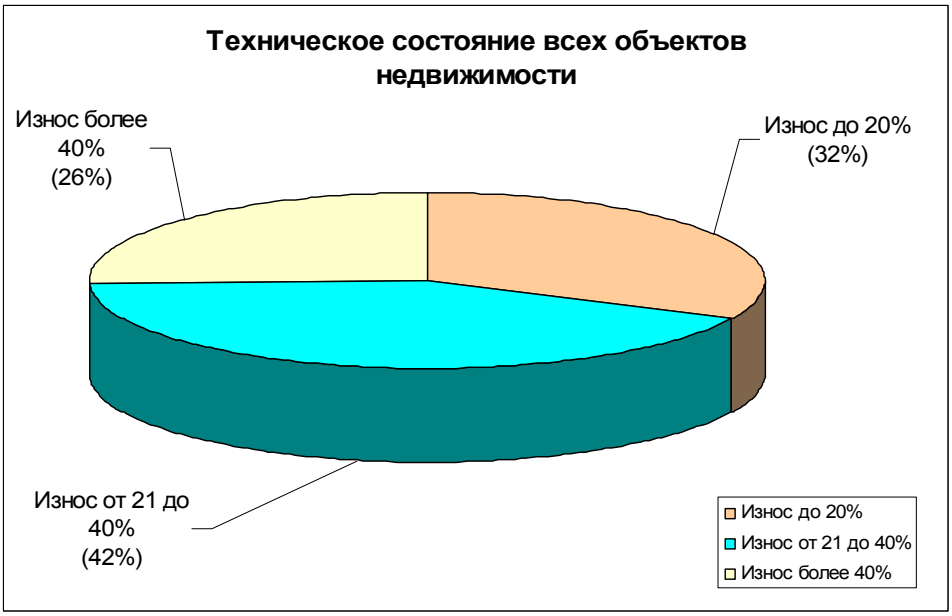


Рисунок 1. Уровень технического состояния недвижимости Санкт-Петербурга (по состоянию на конец 90-х годов XX века)

Как правило, строительные конструкции зданий и сооружений со значительным сроком службы имеют те или иные повреждения. Выявление этих дефектов осуществляется при плановых и неплановых обследованиях технического состояния объектов [3]. Правильное определение возможных причин появления повреждений строительных конструкций, а также прогноз тенденций их изменения необходимы для принятия оптимальных решений по эксплуатационным воздействиям для поддержания работоспособного состояния зданий и сооружений [4].

Однако установление однозначной связи между фактом дефекта и причинами его появления на основе традиционных инструментальных методов представляет собой трудную, а в ряде случаев неразрешимую задачу [3]. Это обусловлено тем, что строительные конструкции отличаются высокой степенью сложности и неопределенности состояния, а также большим числом факторов, приводящих к их дефектам [5].

Одним из современных направлений решения этой проблемы является использование экспертной информации о фактическом техническом состоянии зданий и сооружений [6, 7, 8]. Перспективным является применение методов анализа, которые базируются на аппарате нечеткой логики [9, 10, 11]. Такой подход является актуальным для современного состояния системы эксплуатации зданий и сооружений, поскольку позволяет существенно упростить

процессы принятия решений о планировании и проведении необходимых управляющих воздействий по сравнению с другими известными методами [12, 13] и автоматизировать их.

Объектом рассмотрения в настоящей статье выступают строительные конструкции зданий и сооружений. Предметом исследования являются логические заключения о причинах появления не только текущих, но и прогнозных дефектов конструкций на основе экспертной априорной информации, а также формирование на их основе необходимых эксплуатационных воздействий.

Практическая значимость получаемых результатов состоит в том, что при таком подходе могут быть сокращены затраты на обследование зданий и сооружений путем исключения мероприятий, не связанных с причинами появления дефектов строительных конструкций. Перейдем к изложению существа предлагаемого подхода.

Математическая модель нечеткого вывода заключения о причинах дефекта строительной конструкции

В ходе обследования зданий и сооружений фиксируются дефекты строительных конструкций, а также параметры состояния конструкций, которые могут выступать в качестве предпосылок появления соответствующих дефектов. Предполагается, что между фактом появления конкретного дефекта строительной конструкции и предпосылками к нему существует некоторая взаимосвязь. Характер указанной связи определяют эксперты на основе имеющегося опыта и знаний, причем свое мнение они выражают в терминах естественного языка. Необходимо на основе полученных высказываний специалистов построить математическую модель, позволяющую определять причинно-следственные связи между дефектами строительных конструкций и факторами, влияющими на эти события. Результаты такого моделирования должны быть применимы для принятия решений по управлению техническим состоянием обследуемых зданий и сооружений. Модель, определяющую взаимосвязи между предпосылками и причинами появления тех или иных дефектов СК, можно представить схемой идентификации сложного объекта (рис. 2) [14].

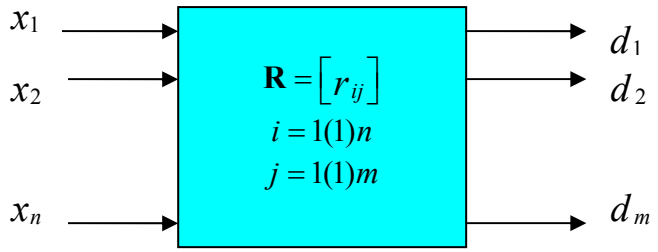


Рисунок 2. Структурная схема модели идентификации дефектов строительной конструкции:
$X = \{x_i\}$, $i = 1(1)n$ **– множество предпосылок появления дефектов строительной конструкции;** n **– общее число предпосылок;**
$D = \{d_j\}$, $j = 1(1)m$ **– множество заключений по причинам дефектов строительной конструкции;** m **– число возможных экспертных заключений;**
$\mathbf{R} = [r_{ij}]$ **(**$i = 1(1)n$; $j = 1(1)m$**) – матрица нечетких отношений между элементами множества** X **и множества** D**.**

Отношения множеств X и D можно в общем виде представить в виде соотношения [15]:

$$D = X * \mathbf{R}, \qquad (1)$$

где символом ($*$) обозначается применение правила композиции нечеткого вывода [15, 16].

Входы X модели (1) обследуемого объекта и ее выходы D будем рассматривать как лингвистические переменные (ЛП), которые оцениваются нечеткими терм-множествами с соответствующими функциями принадлежности (ФП). Например, входной переменной x в соотношении (1) может являться ЛП вида «Тип конструкции здания» и др. Термы ЛП x в этом случае представляют собой высказывания: «сплошная стена», «перегородка» и т.д. Выходной переменной d в модели идентификации (1) может быть ЛП вида «Причина возникновения

дефекта» с термами, соответствующими классам решений. Например, к ним могут относиться такие лингвистические построения, как «Возникновение дефекта по причине предпосылки 1», «Возникновение дефекта по причине предпосылки 2» и т.д. Эти термы также должны иметь свои ФП. Элементы матрицы $\mathbf{R}$ формируются априорно на основе знаний и опыта эксперта. Соотношение (1) можно рассматривать в двух аспектах:

- во-первых, с применением «нисходящих» выводов, когда направление выводов является обратным по отношению к выводам для правил; этот подход может быть использован для исходного формирования модели (1) и разработки расчетной процедуры определения численной меры каждой из причин появления дефектов;
- во-вторых, при использовании «восходящих» выводов, когда выдвигаются гипотезы о значениях контролируемых параметров конструкций и оценивается возможность появления дефектов, соответствующих этим совокупностям входов; этот подход целесообразен при прогнозировании изменения состояния эксплуатируемых зданий и сооружений.

Рассмотрим решение сформулированной задачи.

Формирование модели идентификации строительной конструкции

Система нечеткого вывода по результатам обследования строительной конструкции может быть представлена в виде схемы, представленной на рис. 3.

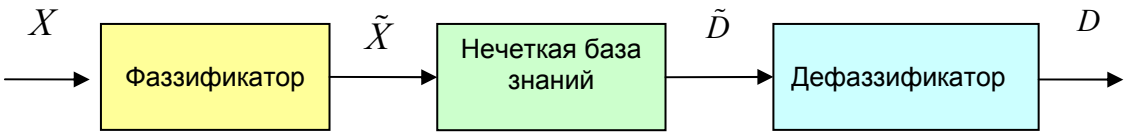


Рисунок 3. Структура системы нечеткого вывода по результатам обследования строительной конструкции

Блоки системы на рис. 2 выполняют следующие функции:

- блок «фаззификатор» преобразует вектор X четких значений параметров состояния конструкции в вектор $\tilde{X}$ значений ФП признаков предпосылок дефектов конструкции, при этом используются ФП нечетких термов, описывающих X;
- блок «нечеткая база знаний» представляет собой совокупность экспертных процедур импликации, которые приводят к получению нечеткого множества $\tilde{D}$ выходных переменных модели (1);
- блок «дефаззификатор» преобразует нечеткое представление выходных параметров модели (1) $\tilde{D}$ в четкое значение D.

Итак, сначала необходимо осуществить переход от конкретных значений X входных переменных модели (1) к значениям $\tilde{X}$ их лингвистических переменных с помощью операции фаззификации (от англ. fuzzy – нечеткий) [13, 14].

Рассмотрим алгоритм осуществления операции фаззификации. Пусть $\tilde{x}$ – ЛП входного параметра модели (1). Для этой ЛП вводятся термы a. Для них будем использовать колоколообразную функцию принадлежности. Эта ФП имеет два параметра: b – значение аргумента, соответствующее максимальному значению ФП и c – коэффициент концентрации [10,13]. Вычисление ФП каждого терма $a_p(\tilde{x})$ ЛП $\tilde{x}$ «Параметр предпосылки» в данном случае осуществляется с помощью соотношения:

$$\mu_p(a(\tilde{x})) = \frac{1}{1+\left(\frac{1}{1+\frac{x-b_a}{c_a}}\right)^2}, \qquad (2)$$

где b_a и c_a – параметры ФП соответствующего терма $a_p(\tilde{x})$ ЛП $\tilde{x}$.

Введем вектор-столбец Q_1 «индикатор выбора терма», который формирует эксперт. Его размерность равна k_x – числу термов переменной $\tilde{x}$. Элемент «1» в этом векторе соответствует выбранному терму, остальные элементы данного вектора – нулевые. Введем также две матрицы Q_2 и Q_3, необходимые для автоматической реализации операции фаззификации. Размерности первой и второй матриц одинаковы и равны $[k_x, 2]$. Матрица Q_2 состоит из единиц. Элементы матрицы Q_3 формируются по правилу:

$$Q_3 = Q_1 \cdot Q_2 . \tag{3}$$

Параметры g^* ФП терма, соответствующего единичному элементу вектора Q_1, определяются из соотношения:

$$g^* = \sum_{i=1}^{k} \prod_{j=1}^{2} g_i \cdot q_{3_{ij}} , \tag{4}$$

где g_i – соответствующий параметр ФП i-го терма ($i = 1(1)k$) рассматриваемой ЛП входного параметра модели (1);
k – количество термов для ЛП входного параметра модели (1).

Расчет параметров фаззификации осуществляется для каждого терма $a_p(\tilde{x})$ с помощью соотношения (2), в которое вместо значения x подставляется значение параметра b_a^*, вычисляемого по формуле (4). Физический смысл описанного алгоритма фаззификации для ЛП входного параметра, имеющего три терма, поясняется графиками на рис. 4. Вертикальная красная линия означает выбор экспертом терма 3. Горизонтальная красная стрелка показывает способ определения значения ФП для терма 2 рассматриваемой ЛП «Параметр состояния строительной конструкции».

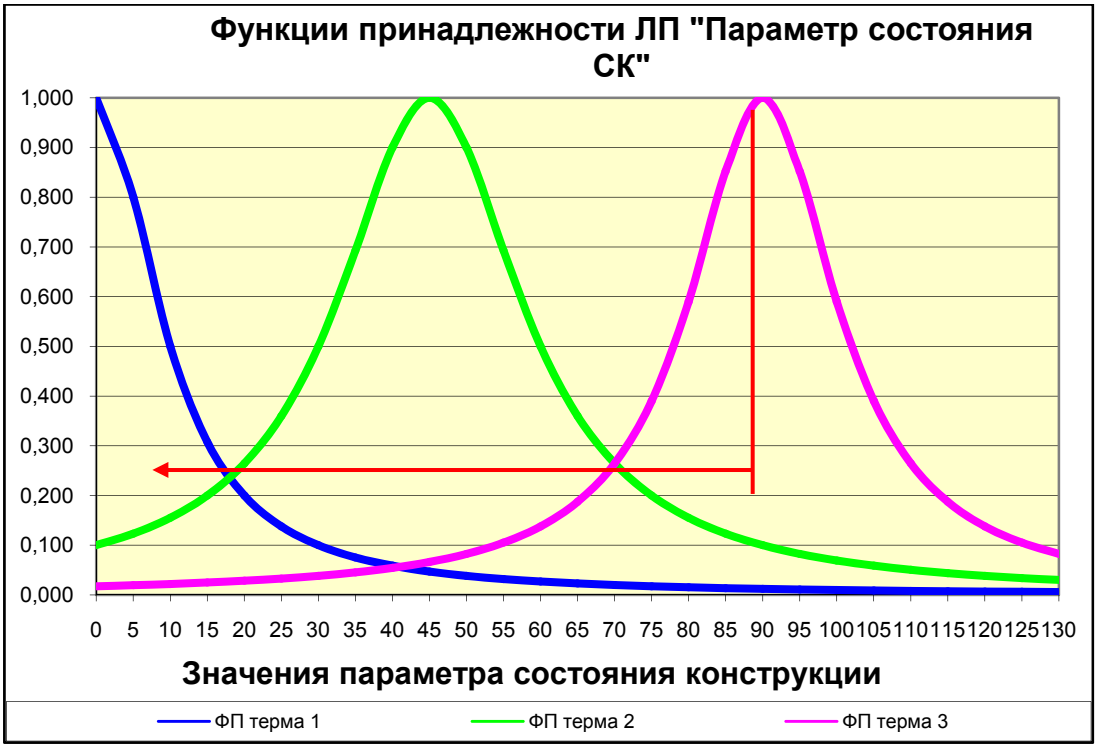


Рисунок 4. Способ выполнения фаззификации параметра строительной конструкции

После фаззификации необходимо осуществить описание зависимостей между лингвистическими переменными $\tilde{x}$ ($\tilde{x} \in \tilde{X}$) и $\tilde{d}$ ($\tilde{d} \in \tilde{D}$). Для этого используем операцию импликации $\tilde{x} \to \tilde{d}$ (если — $\tilde{x}$, то $\tilde{d}$) [14, 15]. В этой логической операции условием (антецедентом) выступает входная переменная $\tilde{x}$ модели (1), а заключением (консеквентом) – выходная переменная $\tilde{d}$ модели (1). В данном случае антецедент представляет собой утверждение типа «x является глубоким», где «глубокий» – это терм лингвистической переменной $\tilde{x}$. При этом консеквентом для модели (1) может рассматриваться утверждение вида: «D есть $\tilde{d}$», где $\tilde{d} \in \tilde{D}$.

Процедуру использования нечеткого логического вывода при использовании указанных продукционных правил разделим на два этапа: обобщение и заключение. На этапе обобщения логического вывода следует определить степень принадлежности всего антецедента правила. Для этого будем использовать оператор вычисления минимального значения степени принадлежности среди всех входных переменных $\tilde{x}$ ($\tilde{x} \in \tilde{X}$), которые формируют конкретное продукционное правило. Это объясняется тем, что в данном случае используемые входные переменные модели (1) объединяются оператором И. Поскольку применительно к одному и тому же результату – дефекту СК, обусловленному одной и той же причиной, – все продукционные правила объединены логической связкой ИЛИ, то будем применять оператор вычисления максимального значения степени принадлежности среди всех продукционных правил [15, 16].

На этапе заключения (логического вывода) будем вычислять значение консеквента. Исходными данными для этой процедуры служат значения степеней принадлежности антецедентов правил, полученные на предыдущем этапе, применительно к каждому из возможных результатов $\tilde{d}$ ($\tilde{d} \in \tilde{D}$). Результат нечеткого вывода при этом будет также нечетким. Он представляется соответствующим термом лингвистической переменной $\tilde{d}$. В данном случае следует применять правило выбора в качестве консеквента такого $\tilde{d}^*$, у которого максимальное значение функции принадлежности. С учетом перечисленных особенностей импликации $\tilde{x} \to \tilde{d}$ нечеткая база знаний описывается с помощью операций $\cup$ (ИЛИ) и $\cap$ (И) в следующей компактной форме:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j}\left[\bigcap_{i=1}^{n}\left(x_i = a_i^{jp}\right) \text{ с весом } w_{jp}\right] \to \tilde{D} = \tilde{d}_j, \; j = 1(1)m. \tag{5}$$

Таким образом, нечеткая база знаний в форме соотношений (4) отображает опыт эксперта и его понимание причинно-следственных связей между предпосылками дефекта и его проявлением [15, 16]. Формирование нечеткой базы знаний может рассматриваться как аналог структурной идентификации, при которой формируется модель обследуемой строительной конструкции с параметрами, которые подлежат последующей подстройке при получении экспериментальных данных об объекте [14]. Переход от нечеткой базы знаний к системе нечетких логических выражений $\tilde{D}$ в соответствии с выражением (4) будем осуществлять с помощью расчетного соотношения:

$$\mu^{d_j}(x_1, x_2, \ldots, x_n) = \bigvee_{p=1}^{k_j}(w_{pj} \cdot \bigwedge_{i=1}^{n}(\mu^{a_i^{jp}}(x_i))), \; j = 1(1)m, \tag{6}$$

где $\mu^{a_i^{jp}}(x_i)$ – ФП переменной x_i для нечеткого терма a_i^{jp} ($j = 1(1)m$; $p = 1(1)k_j$, $i = 1(1)n$);

$\mu^{d_j}(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ – ФП вектора признаков предпосылок дефектов строительной конструкции ($x_1, x_2, \ldots, x_n$) для решения d_j ($j = 1(1)m$);

$\vee(\wedge)$ – операции максимизации (минимизации) соответствующих множеств значений рассматриваемых величин.

Подставляя в формулу (6) вектор $X = \langle x_1, x_2, ..., x_n \rangle$ значений признаков предпосылок возникновения дефектов строительной конструкции, получаем следующее нечеткое множество выходной переменной:

$$\tilde{y} = \left(\frac{\mu^{d_1}(X)}{d_1}; \frac{\mu^{d_2}(X)}{d_2}; ...; \frac{\mu^{d_m}(X)}{d_m} \right). \quad (7)$$

Правило выбора решения о причинах дефекта строительной конструкции в данном случае состоит в выполнении соотношения:

$$y = \underset{\{d_1, d_2, ..., d_m\}}{\arg\max} \ (\mu^{d_1}(X), \mu^{d_2}(X), ..., \mu^{d_m}). \quad (8)$$

В ряде случаев при обследовании строительных конструкций результат, получаемый с помощью соотношения (8), оказывается вполне удовлетворительным (например, если задачей обследования является определение только предаварийных значений параметров конструкции). Когда необходимо конкретизировать полученный результат (перейти к его четкой форме представления), используется процедура дефаззификации (от англ. defuzzification – преобразование нечеткого множества в четкое представление). Указанная процедура осуществляется с помощью одного из известных методов (центра максимума, центра тяжести и др.) на основе анализа соответствующей функции принадлежности $\tilde{D}$ [14, 15].

Для строительных конструкций можно выделить совокупность параметров состояния, которые влияют на дефекты СК, но слабо изменяются во времени. Вторая группа параметров состояния строительных конструкций, в силу ряда случайно действующих факторов, может изменяться во времени. Эту особенность можно использовать для прогнозирования состояния зданий и сооружений. Прогнозирование результатов обследования с использованием соотношений (5)…(8) включает в себя следующие этапы. Сначала решается задача идентификации взаимосвязи предпосылок дефектов конструкций и причин их появления на основе построения модели (1). При этом необходимо использовать все расчетные соотношения, рассмотренные выше. После этого для входных параметров необходимо установить закономерности их изменения во времени и получить прогнозные значения для соответствующих интервалов времени. На основе полученных результатов можно сформировать необходимые управляющие воздействия для обеспечения работоспособности зданий и сооружений. Рассмотрим применение предлагаемого подхода с помощью расчетного примера.

Расчетный пример

Постановка задачи

В качестве анализируемого повреждения строительной конструкции рассматриваются трещины. Наличие и характер трещин в конструкции устанавливаются при обследовании здания. При этом также измеряются параметры признаков предпосылок появления трещин. Кроме этого, имеются полученные экспертным способом правила импликации параметров конструкции в причины появления трещин. Необходимо осуществить прогноз возможности появления дефектов каждого из имеющихся типов в будущие интервалы времени.

Исходные данные для задачи

Состояние строительной конструкции оценивается совокупностью параметров, приведенных в табл. 1. Для описания функций принадлежности нечетких термов параметров состояния строительных конструкций и причин их повреждений используется колоколообразная форма ФП. Возможные причины появления дефектов (трещин) и их термы приведены в табл. 2. Матрица знаний в форме априорно установленных возможностей появления дефектов в зависимости от значений параметров состояния строительных конструкций приведена в табл. 2. Все весовые коэффициенты соответствующих нечетких заключений принимаются равными единице: $w_{ij} = w = 1$.

Примечание. При формировании исходных данных использованы материалы, приведенные в [18]. Используемые числовые данные и правила импликации носят в данном примере иллюстративный характер.

Решение задачи

Содержательный смысл используемых параметров, необходимые числовые значения и результаты расчетов фаззификации (для периода обследования t_1) сведены в табл. 1.

База нечетких знаний для расчетного примера приведена в табл. 2.

Таблица 1

Название терма	Обознач. терма	Параметры ФП терма		Вектор Q_1	Матрица $\mathbf{Q}_2$		Матрица $\mathbf{Q}_3$		Результат фаззификации
		b	c						
ЛП x_1 – «Место расположения трещины»									
Через всю конструкцию	вк	0,000	0,100	0	1	1	0	0	0,322
Между стенами	мс	0,145	0,080	1	1	1	1	1	1,000
В местах примыкания	мп	0,290	0,200	0	1	1	0	0	0,655
От монолитного включения	мв	0,44	0,30	0	1	1	0	0	0,517
На опорах	оп	0,58	0,08	0	1	1	0	0	0,033
В верхней части конструкции	вч	0,73	0,10	0	1	1	0	0	0,029
На свободном поле	вв	0,87	0,20	0	1	1	0	0	0,071
На нижней части конструкции	нч	1,00	0,40	0	1	1	0	0	0,180
ЛП x_2 – «Внешний вид трещины»									
Вертикальная	в	0,000	10,000	1	1	1	1	1	1,000
Наклонная	н	45,000	15,000	0	1	1	0	0	0,100
Горизонтальная	г	90,000	12,000	0	1	1	0	0	0,017
ЛП x_3 – «Направление раскрытия трещины»									
Верхнее	вр	0,000	0,100	1	1	1	1	1	1,000
Равномерное	рр	0,500	0,300	0	1	1	0	0	0,265
Нижнее	нр	1,000	0,200	0	1	1	0	0	0,038
ЛП x_4 – «Ширина трещины»									
Волосная	вол	0,000	0,100	0	1	1	0	0	0,002
Мелкая	мел	2,000	2,000	1	1	1	1	1	1,000
Развитая	раз	5,500	2,000	0	1	1	0	0	0,246
Большая	бол	12,000	4,000	0	1	1	0	0	0,138
Крупная	кр	35,000	10,000	0	1	1	0	0	0,084

Таблица 2

№ п/п	Терм ЛП x_1	Терм ЛП x_2	Терм ЛП x_3	Терм ЛП x_4	Промежуточные значения ФП термов ЛП «Причина повреждения конструкции»	Термы ЛП «Причина повреждения конструкции»
1	оп	в	вр	вол	d1	Статические перегрузки конструкции
2	чв	к	вр	вол	d1	
3	оп	в	вр	др	d1	
4	вч	к	вр	др	d1	
5	вп	в	рр	др	d1	
6	мп	в	вр	вол	d1	
7	вч	в	вр	вол	d1	
8	оп	в	вр	вол	d1	

№ п/п	Терм ЛП x_1	Терм ЛП x_2	Терм ЛП x_3	Терм ЛП x_4	Промежуточные значения ФП термов ЛП «Причина повреждения конструкции»	Термы ЛП «Причина повреждения конструкции»
9	мп	в	вр	вол	d2	Динамические перегрузки конструкции
10	чв	к	рр	вол	d2	
11	сп	в	вр	др	d2	
12	вч	к	вр	др	d2	
13	оп	в	вр	раз	d2	
14	мс	в	вр	раз	d2	
15	вч	в	вр	кр	d5	Температурные деформации конструкции
16	сп	к	рр	вол	d5	
17	вч	к	вр	др	d5	
18	сп	в	рр	бол	d5	
19	сп	в	рр	кр	d5	

Результаты расчета параметров модели (1) (для периода обследования t_1) в соответствии с базой знаний (табл. 2) приведены в табл. 3.

Таблица 3

№ п/п	Терм ЛП x_1	Терм ЛП x_2	Терм ЛП x_3	Терм ЛП x_4	Промежуточные значения ФП термов ЛП «Причина повреждения конструкции»	Термы ЛП «Причина повреждения конструкции»	ФП термов ЛП «Причина повреждения конструкции»
1	0,033	1,000	1,000	0,002	0,002	Образование трещины в конструкции из-за статичных перегрузок	0,071
2	0,322	0,100	1,000	0,002	0,002		
3	0,033	1,000	1,000	1,000	0,033		
4	0,029	0,100	1,000	1,000	0,029		
5	0,071	1,000	0,265	1,000	0,071		
6	0,655	1,000	1,000	0,002	0,002		
7	0,029	1,000	1,000	0,002	0,002		
8	0,033	1,000	1,000	0,002	0,002		
9	0,655	1,000	1,000	0,002	0,002	Образование трещины из-за динамичных перегрузок	0,246
10	0,322	0,100	0,265	0,002	0,002		
11	0,071	1,000	1,000	1,000	0,071		
12	0,029	0,100	1,000	1,000	0,029		
13	0,033	1,000	1,000	0,246	0,033		
14	1,000	1,000	1,000	0,246	0,246		
40	0,029	1,000	1,000	0,084	0,029	Образование трещины в конструкции из-за температурных деформаций	0,071
41	0,071	0,100	0,265	1,000	0,071		
42	0,029	0,100	1,000	1,000	0,029		
43	0,071	1,000	0,265	0,138	0,071		
44	0,071	1,000	0,265	1,000	0,071		

Результаты прогнозирования появления повреждений строительных конструкций по каждой из возможных причин представлены в графической форме (рис. 5).

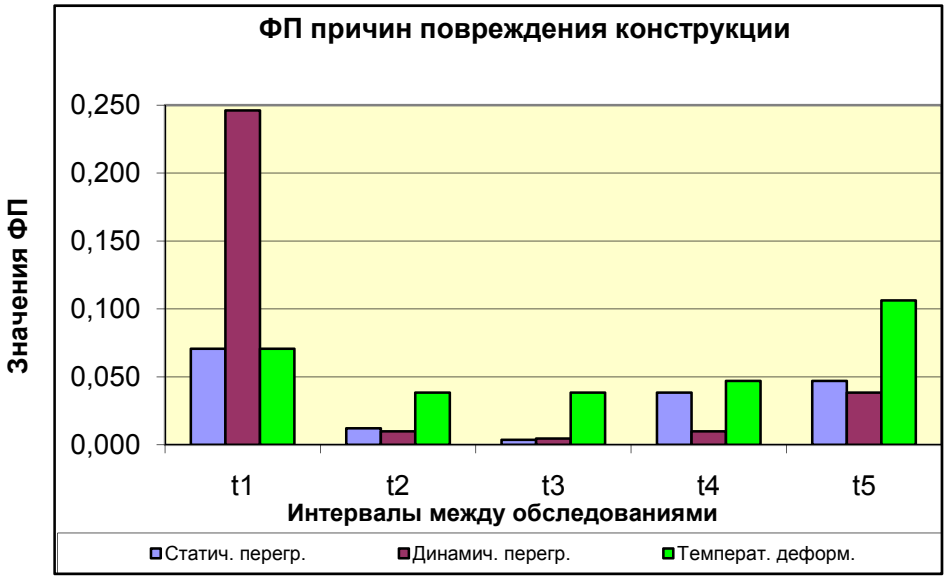


Рисунок 5. Значения ФП термов ЛП «Причина повреждения конструкции»

Из графиков, представленных на рис. 5, следует, что наиболее ожидаемой причиной повреждения конструкции в период t_1 являются динамические перегрузки, а в периоды t_2; t_3, t_4 и t_5 – температурные деформации конструкции, причем с увеличением интервалов времени возможность этой причины возрастает.

Выводы

На основе представленного материала можно сделать следующие выводы. Используя аппарат нечеткой логики, можно построить модель идентификации причин возникновения дефектов строительных конструкций различного типа. Одним из основных элементов модели является база нечетких знаний для определенных типов дефектов конструкций зданий и сооружений, при формировании которой используются знания и опыт строителей-экспертов. Данная модель позволяет осуществить прогнозирование появления повреждений зданий и сооружений по тем или иным возможным причинам. Получаемые прогнозы позволяют сократить расходы на обследования строительных объектов и дальнейшие эксплуатационные воздействия на них.

Анализ известных работ, посвященных обследованиям зданий и сооружений, показал, что в рассматриваемых методах и моделях не в полной мере учитывается неопределенность получаемых фактических данных о строительных конструкциях, обусловленная их высокой сложностью и большим числом факторов, приводящих к повреждениям. Выходом из создавшегося положения является использование знаний и опыта строителей-экспертов совместно с результатами инструментального и визуального контроля.

В статье обоснована актуальность разработки моделей идентификации и прогнозирования применительно к причинам возникновения повреждений строительных конструкций. С помощью предлагаемого подхода снижается уровень неопределенности при планировании эксплуатационных воздействий на здания и сооружения, а также создаются предпосылки автоматизации сложной логической обработки экспериментальных и экспертных данных. Критерием отбора мероприятий и соответствующих ресурсов, необходимых для конкретного обследования, выступает конечное заключение (консеквент) логического вывода о прогнозируемых причинах появления дефектов контролируемых зданий и сооружений. Данный подход может найти практическое применение в компаниях, на балансе которых имеются здания и сооружения.

Литература

1. Рогонский В. А., Кострица А. И., Шеряков В. Ф. Эксплуатационная надежность зданий и сооружений. СПб. : Стройиздат СПб, 2004. 272 с.
2. Овчинникова С. К. и др.Технология управления недвижимостью города: Учеб. пособие. СПб. : Изд-во СПбГТУ, 1996. 64 с.
3. Обследование и испытание зданий и сооружений. Поверочные расчеты: Метод. указания / Сост. В.А. Соколов, Л.Н. Синяков, Д.А. Страхов. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 68 с.
4. Солдатенко Т. Н. Программа обслуживания комплекса жизнеобеспечения здания, оптимальная по нескольким критериям // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. №2(120). С. 81-86.
5. Ройтман А. Г. Надежность конструкций эксплуатируемых зданий. М. : Стройиздат, 1985. 175 с.
6. Солдатенко Т. Н. Экспертно-статистический метод оценивания параметров управляющих воздействий на инженерные сети зданий в условиях неопределенности // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 5. С. 60-66.
7. Уткин В. С., Уткин Л. В. Экспертный метод определения физического износа зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2000. № 1. С. 48.
8. Shtovba S., Rotshtein A., Pankevich O., Fuzzy Rule Based System for Diagnosis of Stone Construction Cracks of Buildings // Advances in Computational Intelligence and Learning, Methods and Applications. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, 2002. Pp. 401-412.
9. Соколов В. А. Диагностика технического состояния конструкций зданий и сооружений с использованием методов теории нечетких множеств // Инженерно-строительный журнал. 2010. №5(15). С. 31-37.
10. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. М. : Мир, 1976. 167 с.
11. Борисов А. Н., Крумберг О. А., Федоров И. П. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования. Рига : Зинатне, 1990. 184 с.
12. Liu K.F.R. A Possibilistic Petri Net Model for Diagnosing Cracks in RC Structures // Computer-Aided Civil and infrastructure Engineering. vol. 18. 2003. Pp. 426-439.
13. Физдель И. А. Дефекты в конструкциях, сооружениях и методы их устранения. 2-е изд. М. : Стройиздат, 1987. 336 с.
14. Алексеев А. А., Кораблев Ю. А., Шестопалов М. Ю. Идентификация и диагностика систем: учеб. для студ. высш. учеб. заведений. М. : Издательский центр «Академия», 2009. 352 с.
15. Прикладные нечеткие системы: пер. с япон. / К. Асаи, Д. Ватада, С. Иван и др.; под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. М. : Мир, 1993. 368 с.
16. Ротштейн А. П., Кательников Д. И. Идентификация нелинейных объектов нечеткими базами знаний // Кибернетика и системный анализ. 1998. №5. С. 53-61.
17. Рекомендации по оценке состояния и усилению строительных конструкций промзданий и сооружений. М. : НИИСК, 1989. 65 с.
18. Панкевич О. Д., Штовба С. Д. Діагностування тріщин будівельних констркцій за допомогою нечітких баз знань. Монографія. Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2005. 108 с.

**Тамара Николаевна Солдатенко, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7(812)297-59-49; эл. почта: soldatenko-tn@bk.ru

Обобщенный показатель качества стальных конструкций

Аспирант А.Н. Ульшин*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Ключевые слова: качество стальных конструкций; обобщенный показатель качества; стальные стержневые конструкции

Для уменьшения расхода ресурсов и обеспечения должного уровня качества как при изготовлении, так и при монтаже металлоконструкций необходимо исследовать обобщенный показатель технологичности и обобщенный показатель качества для последующего их применения при проектировании конструкций. Обобщенный показатель технологичности состоит из количественных показателей. Обобщенный показатель качества состоит из качественных показателей. Количественные показатели характеризуют эффективность расхода основных ресурсов.[1] Качественные характеризуют качество конструкции. Качественные и количественные показатели находятся во взаимосвязи, поэтому при проектировании должны рассматриваться в составе единой системы.

В данной статье автором будет рассмотрен обобщенный показатель качества. В работах [2,3,4,5] рассмотрены отдельные свойства полного качества стальных конструкций, попыток вывода обобщенного показателя качества именно для стальных стержневых конструкций нет ни в трудах отечественных, ни в трудах зарубежных ученых.

Для качественной оценки предлагается вывести обобщенный показатель качества. С помощью данного показателя определяется максимально возможное качество изготовленной и смонтированной конструкции на уровне проекта.

Для нахождения обобщенного показателя качества автор предлагает следующую последовательность действий, основанную на квалиметрическом подходе к оценке качества [6,7,8]:

1) составление иерархической структурной схемы свойств стальных стержневых конструкций на основе экспертного опроса;
2) нахождение для каждого из свойств их показателей (вывод) и весомостей (экспертный опрос);
3) вывод формулы обобщенного показателя качества стальной стержневой конструкции K_o.

1. Составление иерархической структуры свойств качества стальных стержневых конструкций

Для формирования иерархической структуры дерева свойств необходимо выяснить, какие требования предъявляются к стальным стержневым конструкциям, и систематизировать их. С этой целью автором статьи был организован экспертный опрос компетентных в вопросе качества групп, которым было предложено определить набор свойств, которыми, по их мнению, должна обладать стальная стержневая конструкция. При организации экспертного опроса и подборе специалистов были использованы исследования Портновой И.М [9], касающиеся повышения объективности и точности оценок.

Формирование иерархической структуры происходит для изготовленной, покрытой антикоррозийным покрытием и смонтированной конструкции.

Компетентные группы сформированы путем отбора специалистов на каждом уровне, на котором задается или утрачивается качество металлоконструкций.

Состав компетентной группы следующий:

- проектировщики стержневых металлоконструкций – 10 человек;
- специалисты, занимающиеся обследованием стержневые металлоконструкций, – 10 человек;
- технологи, специалисты из отдела технического контроля, работающие в области изготовления стержневых металлоконструкций, – 10 человек;

- разработчики проектов производства работ на монтаж стержневых металлоконструкций – 10 человек;
- специалисты эксплуатирующих организаций – 10 человек.

Набор свойств, полученный автором в результате экспертного опроса, был сопоставлен с набором свойств в исследовании [10] для стальных конструкций и оценен как более полный.

В результате опроса все свойства были сгруппированы в иерархическое дерево (таблица 1).

Таблица 1. Иерархическая структура свойств, составляющих качество стальной стержневой конструкции

<table>
<tr><th colspan="4">Уровни качества стальной стержневой конструкции</th></tr>
<tr><th>третий</th><th>второй</th><th>первый</th><th>нулевой</th></tr>
<tr><td>Сопротивление сдвигу и растяжению болтового соединения</td><td rowspan="4">прочность</td><td rowspan="7">функциональность</td><td rowspan="19">Качество в целом</td></tr>
<tr><td>Сопротивление нагрузкам сварного соединения</td></tr>
<tr><td>Сопротивление нагрузкам узлов</td></tr>
<tr><td>Сопротивление нагрузкам стержня (стержней)</td></tr>
<tr><td>Общая устойчивость</td><td rowspan="2">устойчивость</td></tr>
<tr><td>Местная устойчивость</td></tr>
<tr><td>Ограничение прогиба</td><td>затруднение нормальной эксплуатации</td></tr>
<tr><td>Расход краски</td><td rowspan="3">эксплуатационная</td><td rowspan="3">экономичность</td></tr>
<tr><td>Трудоемкость при повторном покрытии</td></tr>
<tr><td>Срок службы покрытия</td></tr>
<tr><td>По нагрузке</td><td rowspan="6">эксплуатационная</td><td rowspan="6">надежность</td></tr>
<tr><td>Точность изготовления отдельных частей</td></tr>
<tr><td>Сохранность форм при транспортировке</td></tr>
<tr><td>Точность сборки</td></tr>
<tr><td>Качество сварных швов</td></tr>
<tr><td>Качество выполнения монтажных соединений</td></tr>
<tr><td>Сохранность внешнего вида при атмосферном воздействии</td><td>архитектурно-отделочные качества</td><td>эстетичность</td></tr>
<tr><td>Габаритные размеры</td><td rowspan="2">возможность транспортировки</td><td rowspan="3">транспортабельность</td></tr>
<tr><td>масса</td></tr>
<tr><td>Минимально выступающие части за основной стержень</td><td>удобство при транспортировке</td></tr>
</table>

2. Нахождение для каждого из свойств их показателей и весомостей

При нахождении обобщенного показателя качества квалификация рабочих и качество исходных материалов принимаются идеальными, т.е. показатели точности сборки, качества сварных швов, качества монтажных соединений равны 1. Также в точности изготовления отдельных элементов исключается ошибка человека в связи с низкой квалификацией, качество полностью зависит от оборудования. Таким образом, непрогнозируемые свойства не учитываются при нахождении формулы определения полного качества.

Далее автор предлагает для каждого из прогнозируемых свойств показатели.

Функциональность включает:

- сопротивление сдвигу и растяжению болтового соединения;
- сопротивление нагрузкам сварного соединения;
- сопротивление нагрузкам узла;
- сопротивление нагрузкам стержня (стержней);
- общая устойчивость;
- местная устойчивость;
- ограничение прогиба.

Все значения показателей по данным свойствам должны быть не менее нормативных значений, определяемых по СНиП II-23-81*, в противном случае происходит перерасход ресурсов при неизменном качестве. Поэтому при проектировании необходимо стремиться, чтобы все отдельные свойства функционального качества были близки к нормативным.

Транспортабельность определяется массой и габаритами конструкции. Для оценки транспортабельности существует два показателя: показатель транспортабельности по габаритам и показатель транспортабельности по массе.

Показатель транспортабельности по габаритам:

$$K_{\text{тр1}} = \frac{P^{б}_{\text{габ}}}{P_{\text{габ}}}, \qquad (1)$$

$$P_{\text{габ}} = a \times b \times c,$$

где a – высота конструкции;
b – ширина конструкции;
c – длина конструкции;
$P^{\text{б}}_{\text{габ}} = a_{\text{б}} \times b_{\text{б}} \times c_{\text{б}}$,
где $a_{\text{б}}$ – высота кузова транспортного средства;
$b_{\text{б}}$ – ширина кузова транспортного средства;
$c_{\text{б}}$ – длина кузова транспортного средства.

Показатель транспортабельности по массе:

$$K_{\text{тр2}} = \frac{P^{б}_{\text{масса}}}{P_{\text{масса}}}, \qquad (2)$$

где $P_{\text{масса}}$ – масса конструкции;
$P^{\text{б}}_{\text{масса}}$ – максимальная грузоподъемность транспортного средства.

Обязательное условие транспортабельности:

$$K_{тр1} \geq 1, \; K_{\text{тр2}} \geq 1.$$

Удобство при транспортировке. Чем меньше выступающие элементы, тем более удобна для транспортировки конструкция.

$$K_{\text{утр}} = \frac{P^{\text{б}}_{\text{габ.уд.}}}{P_{\text{габ}}}. \qquad (3)$$

Для одностержневых конструкций:

$P_{\text{габ}} = a \times b \times c,$

где a – высота конструкции;

b – ширина конструкции;

c – длина конструкции.

$P^{\text{б}}_{\text{габ.уд}} = a_{\text{уб}} \times b_{\text{уб}} \times c_{\text{уб}},$

где $a_{\text{уб}}$ – высота проката основного стержня;

$b_{\text{уб}}$ – ширина проката основного стержня;

$c_{\text{уб}}$ – длина проката основного стержня.

Для многостержневых конструкций (ферм):

$P_{\text{габ}} = a \times b \times c,$

где a – высота листового элемента узла поясного стержня;

b – ширина поясного листового элемента узла поясного стержня;

c - длина листового элемента узла поясного стержня.

$P^{б}_{габ.уд} = a_{\text{уб}} \times b_{\text{уб}} \times c_{\text{уб}},$

где $a_{\text{уб}}$ – высота поясного стержня, к которому приходит листовой элемент узла;

$b_{\text{уб}}$ – ширина поясного стержня, к которому приходит листовой элемент;

$c_{\text{уб}}$ – длина поясного стержня, к которому приходит листовой элемент.

$K_{\text{утр}} = 1$ для идеальной конструкции.

Надежность состоит из трех показателей: эксплуатационной надежности, сохранности форм при транспортировке и точности изготовления [11].

Показатель эксплуатационной надежности:

$$K_{\text{эн}} = \frac{\chi}{\chi^{\text{б}}}, \tag{4}$$

где $\chi_{\text{б}} = \chi_1 \times \chi_2 \times \chi_3$ выведена Мельниковым Н.П. в [5],

где χ_1 – коэффициент перегрузки;

χ_2 – коэффициент однородности свойств материала;

χ_3 – коэффициент условий работы;

χ – фактический коэффициент безопасности.

$$\chi = \frac{P_{\text{факт}}}{P_{\text{норм}}}, \tag{5}$$

где $P_{\text{факт}}$ – фактическая максимальная нагрузка, которая может быть воспринята конструкцией, исходя из ее максимальной несущей способности;

$P_{\text{норм}}$ – суммарная временная и постоянная нагрузка определяется по СНиП 2.01.07-85*.

$K_{эн} \geq 1.$

Формула для нахождения значения χ является приближенной, для более точного расчета необходимо использовать формулы, опирающиеся на аналитические модели максимумов нагрузок и внутренних силовых факторов. Подробное создание таких моделей описано в [12].

Сохранность форм. Наиболее сильно при транспортировке от случайных усилий меняют форму элементы, закрепленные с одной стороны и имеющие максимальную длину от места закрепления. Определяется по формуле (3). $K_{\text{утр}} = 1$ для идеальной конструкции.

Точность изготовления отдельных элементов конструкции особенно важна при изготовлении элементов узлов, поверхности которых передают усилие через соприкосновение, а также при изготовлении фасонных элементов, соединяющих стержни ферм и других

многостержневых конструкций. При изготовлении конструкций, имеющих фрикционные соединения узлов, важно, чтобы стержни имели точный рез. В случае изготовления ферм также важны точные углы реза элементов. Точность изготовления отдельных элементов определяется точностью оборудования.

Автором были сформированы показатели на основе исследований [13].

Показатель точности изготовления стержней:

$$K_{\text{тис}} = \frac{T_{\text{с}}^{\text{б}}}{T_{\text{с}}}, \quad (6)$$

где $T_{\text{с}}$ – точность используемого для реза оборудования;

$T_{\text{с}}^{\text{б}}$ – точность принятая за базовую (1 мм).

$K_{\text{тис}} \geq 1$.

Показатель точности изготовления пластин:

$$K_{\text{тип}} = \frac{T_{\text{п}}^{\text{б}}}{T_{\text{п}}}, \quad (7)$$

где $T_{\text{п}}$ – точность используемого для реза оборудования;

$T_{\text{п}}^{\text{б}}$ – точность принятая за базовую (1 мм).

$1 \leq K_{\text{тип}} < 2$ для всех остальных конструкций.

$K_{\text{тип}} \geq 2$ для опорных элементов ферм, поверхностей, передающих усилие через соприкосновение, элементов многоугольной сложной формы, пластин под высокопрочные болты.

Показатель точности расположения отверстий:

$$K_{\text{тио}} = \frac{T_{\text{о}}^{\text{б}}}{T_{\text{о}}}, \quad (8)$$

где $T_{\text{о}}$ – точность расположения отверстий относительно друг друга (расстояние между центрами или координаты центров);

$T_{\text{о}}^{\text{б}}$ – точность, принятая за базовую (1 мм для болтов нормальной прочности, 0,5 мм для высокопрочных болтов). Показывает разницу между диаметром отверстия и диаметром болта.

Экономичность эксплуатации

Простота окраски зависит от распределения массы в пространстве: для пространственных структур 0,5; для ферм 0,7; для балок 1.

Низкая стоимость антикоррозионной обработки зависит от распределения массы в пространстве: для пространственных структур 0,5; для ферм 0,7; для балок 1.

Для нахождения весомостей отдельных свойств используем метод экспертных оценок. Под методом экспертных оценок решений принимается определение количественной характеристики качества технологичности путем опроса специалистов высокой квалификации и оценка объективности их ответов с помощью современных математических методов и средств, исключающих случайные суждения.

Процедуру получения экспертных оценок весомости можно разбить на четыре этапа [7]:

- организация опроса;
- проведение опроса;
- обработка результатов опроса и получение оценок весомости;
- анализ результатов.

Организация опроса. На этом этапе главное – выбор экспертов. Объективность экспертной оценки, ее точность и надежность зависит в основном от квалификации эксперта. Чем более квалифицированный эксперт, тем ближе оценка относительно к истинной.

В данном случае будем использовать способ определения квалификации эксперта, который основан на сравнении его оценки со значением средней оценки, которая условно принимается за истинную [9]. Отклонение оценок отдельных экспертов от средней принимается как погрешность оценки. Эта погрешность и будет служить критерием квалификации эксперта. Чем больше погрешность, тем ниже «вес» эксперта. [6]

Следует принимать во внимание, что эксперту сложно без значительной ошибки выносить решение, когда приходится учитывать более семи альтернатив, например, назначать весомость более чем семи свойствам [9].

Каждый из экспертов опрашивается отдельно, чтобы ни один из них не мог влиять на мнение другого.

Проведение опроса. Первичная статистическая обработка данных экспертных оценок предполагает создание количественных выборок, характеризующих мнения каждого из приглашенных экспертов.

Для нахождения весомостей воспользуемся методом ранга. Рассматриваемая методика предполагает оценку каждого свойства по десятибалльной шкале [6]. Каждый эксперт назначает каждому из объектов (транспортабельность, надежность, экономичность эксплуатации) определенное количество баллов от 1 до 10.

Обработка результатов опроса и получение оценок весомости. Получение весомостей свойств происходит по формулам [6]:

$$M_i = \frac{\sum_{l=1}^{r} M_{il}}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{l=1}^{r} M_{il}}, \qquad M_{il} = \frac{P_{il}}{\sum_{i=1}^{n} P_{il}}, \tag{9}$$

где P_{il} – оценка i-го свойства у l-го эксперта;

n – количество свойств;

r – количество экспертов.

Анализ результатов. После того, как экспертные выборки введены в электронные таблицы, необходимо с помощью средств описательной статистики в компактной и наглядной форме представить результаты наблюдений. Полезность методов описательной статистики состоит в том, что по небольшому набору специально выбранных статистических показателей на стадии первичной обработки можно оценить основные и характерные черты экспертных выборок.

Автором использовались статистические показатели для обработки результатов исследований, широко представленные в работах [14,15]. Описывающие выборку показатели можно разбить на несколько групп.

1. *Показатели положения* описывают расположение данных числовой оси. К ним относятся: наименьший и наибольший элемент выборки, верхний и нижний квартили (квартили ограничивают зону, в которую попадают 50% центральных элементов выборки), среднее арифметическое из всех наблюдений, выборочная медиана и другие аналогичные характеристики [14].
2. *Показатели масштаба* описывают степень разброса данных относительно своего центра. К ним относятся: дисперсия выборки, оценка стандартного отклонения, размах выборки (разность между максимальным и минимальными элементами), межквартильный размах (разность между верхней и нижней квартилью), медиана абсолютных отклонений от медианы и так далее. Все эти показатели позволяют судить о том, насколько кучно группируется основная масса данных относительно центра, таким образом, что чем меньше разброс, тем меньше все показатели разброса [15].

3. *Показатели асимметрии* оценивают степень симметрии распределения выборки относительно центра. К ним относят: коэффициент асимметрии, положение выборочной медианы относительно среднего арифметического, гистограмму выборки [15].

Результаты экспертных оценок определения весомостей отражены в таблице 2. В данной таблице показатели некоторых свойств приняты за 1, так как их значения менее 1 не допускают строительные нормы на изготовление и монтаж стальных стержневых конструкции, а больше 1 они не могут быть, так как увеличение показателя не увеличивает реальное качество.

Таблица 2. Расчет комплексного показателя качества

Свойства третьего уровня	**Коэф-фици-ент весо-мости** $K_{в.i}$	**Показа-тель свойства третьего уровня** K_i	**Комплексный критерий качества свойства 2-го уровня** $N_j = \sum K_i \times K_{в.i.}$	**Коэф-фициент значимости комплекс-ного критерия** $K_{в.j}$	**Обобщен-ный критерий** $O = N_j \times K_{в.j.}$	**Обобщен-ный показатель качества** $K_o^{по} = \sum O$
Третий уровень			**Второй уровень**		**Первый уровень**	**Нулевой уровень**
Уровни качества стальной стержневой конструкции						
Сопротивление сдвигу и растяжению болтового соединения (проектное)	0,25	1	1	0,27	Функциональ-ность (0,8 N_j)	Качество в целом
Сопротивление нагрузкам сварного соединения (проектное)	0,25	1				
Сопротивление узла	0,25	1				
Сопротивление стержней	0,25	1				
Общая устойчивость	0,5	1	1	0,27		
Местная устойчивость	0,5	1				
Прогиб менее допустимого	0,5	1	1	0,27		
По массе	0,4	$K_{тр1}$	0,4 $K_{тр1}$ +0,4 $K_{тр2}$ +0,2 $K_{уд.тр.}$	0,02	Транспорта-бельность (0,02 N_j)	
По габаритам	0,4	$K_{тр2}$				
Минимально выступающие части за основной стержень	0,2	$K_{уд.тр.}$				
По нагрузке	0,65	$K_{эн}$	0,65 $K_{эн}$ + 0,05 $K_{утр}$ +0,05 $K_{тис}$ +0,05 $K_{тип}$	0,16	Надежность (0,16 N_j)	
При транспорти-ровке	0,05	$K_{утр}$				

По точности изготовления стержней	0,05	$K_{тис}$	+0,05 $K_{тио}$ +0,15			
По точности изготовления пластин	0,05	$K_{тип}$				
По точности изготовления отверстий	0,05	$K_{тио}$				
Точность сборки	0,05	1				
Качество сварных швов фактическое	0,05	1				
Качество монтажных соединений фактическое	0,05	1				
Расход краски	0,15	$K_{расх.кр}$	0,15 $K_{расх.кр}$ +0,15 $K_{тр.о}$ +0,7 $K_{ср.сл}$	0,02	Экономичность эксплуатации (0,02 N_j)	
Трудоемкость при повторном покрытии	0,15	$K_{тр.о}$				
Срок службы покрытия	0,7	$K_{ср.сл}$				
Сохранность внешнего вида при атмосферном воздействии	-	-	-	-	Эстетичность (менее 0,01 N_j)	

3. Вывод формулы обобщенного показателя качества стальной стержневой конструкции K_0

В ходе суммирования произведений весомостей на показатели отдельных свойств была получена следующая формула:

$$K_0 = 0{,}8 + 0{,}008K_{тр1} + 0{,}008K_{тр2} + 0{,}004K_{уд.тр} + 0{,}104K_{эн} + 0{,}008K_{утр} + 0{,}008K_{тис} + 0{,}008K_{тип} + 0{,}008K_{тио} + 0{,}024 + 0{,}003K_{расх.кр} + 0{,}003K_{тр.о} + 0{,}014K_{ср.п}. \quad (10)$$

Для оценки качества используем следующую таблицу.

Таблица 3. Оценка уровня качества

Значение обобщенного показателя качества	Оценка уровня качества
Менее 0,904	Недопустимый уровень качества
0,904 – 0,95	Низкий уровень качества
0,95- 1	Высокий уровень качества

Граница между недопустимым уровнем качества и низким уровнем качества определяется исходя из назначения минимально возможных показателей отдельных свойств качества.

Выводы

1. В результате проведения экспертного опроса определены свойства, составляющие качество, их весомости и предложены отдельные показатели свойств.

2. Выведена формула (10) обобщенного показателя качества стальной стержневой конструкции.

Разработанная формула (10) для нахождения обобщенного показателя качества стальной стержневой конструкции может быть использована при проектировании совместно с обобщенным показателем технологичности. Это позволит сократить расход ресурсов и обеспечить должный уровень качества как при изготовлении, так и при монтаже металлоконструкций. Также показатель может быть использован отдельно для оценки качества конструкции в целом.

Литература

1. Амиров Ю. Д., Алферова Т. К., Волков П. Н. Технологичность конструкции изделия. М. : Машиностроение, 1990. 768 с.
2. Исследование и развитие теории конструктивной формы металлических конструкций. Вып.21 / ЦНИИпроектстальконструкция. М. , 1977. 76 с.
3. Мельников Н. П. Исследования процессов заводского производства строительных металлоконструкций / ЦНИИпроектстальконструкция. М. , 1981. 104 с.
4. Материалы по металлическим конструкциям. Вып. 12 / ЦНИИпроектстальконструкция. М. , 1967. 131 с.
5. Материалы по металлическим конструкциям. Вып. 9 / ЦНИИпроектстальконструкция. М. , 1967. 101 с.
6. Азгальдов Г. Г. Квалиметрия в архитектурно-строительном проектировании. М. : Стройиздат. 1989. 264 с.
7. Азгальдов Г. Г.Теория и практика оценки качества товаров. М. : Экономика, 1982. 256 с.
8. Азгальдов Г. Г., Гличев А.В. Квалиметрия – наука об измерении качества продукции // Стандарты и качество. 2007. №4. С. 62-63.
9. Портнова И. М. Совершенствование системы оценивания качества продукции: Дисс ... канд.техн.наук. Самара, 2005. 206 с.
10. Pemes P., Campian C. Comparative Study regarding the use of steel and wood for an industrial building // Acta Technica Naposensis. 2008. Vol.50. №1. Pp. 427-435.
11. Van de Lindt J. W., Pei S. Buckling reliability of deteriorating steel beam ends // Electronic Journal of Structural Engineering. 2006. №6. Pp. 1-7.
12. Пичугин С. Ф., Махинько А. В. Некоторые вопросы расчета надежности металлоконструкций // Металлические конструкции. 2006. Т. 11. С. 187-196.
13. Пашеева Т. Ю. О точности заготовки и ее влияние на качество изготовления металлоконструкций // Заготовительные производства в машиностроении (кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства). 2009. № 10. С. 51-55.
14. Giurka I. The choice of Boilers Using Global Evaluation Method of Performances // Acta Technica Naposensis-2010. Vol.53. №1. Pp. 214-221.
15. Castro-Lacouture D., Skibniewski M. J. Quantitative assessment of web-based constructions management systems: application in rebar design and estimation // Electronic Journal of Information Technology in Construction. 2005. Vol. 10. Pp. 229-244.

** Алексей Николаевич Ульшин, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. моб.: +7(981)725-45-99; эл. почта: lesha.ul@mail.ru

Критерии выбора вибропогружателей

К.т.н., доцент Г.Я. Булатов*;
доцент Н.Б. Колосова,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: вибропогружатели свай; критерии выбора; вынуждающая сила вибропогружателя; статический момент дебалансов; амплитуда колебаний; скорость вибропогружения

В последние годы актуальность создания сверхнадежных фундаментов в России повышается из-за активного перехода к высотному строительству. В связи с этим важна оценка безопасности возведения таких фундаментов как для производителей работ, так и для окружающей среды. По мнению авторов, технология устройства свайного фундамента с помощью вибропогружателей является оптимальной по параметру безопасности и щадящей для окружающей застройки.

В настоящее время известны следующие типы вибропогружателей [1-7]:

- направленного действия (низко- и высокочастотные);
- с пригрузочной подрессоренной плитой;
- вибромолоты;
- вибраторы двойного действия;
- с распределенным внутри сваи-оболочки вибровозбудителем (виброцепь);
- вибровдавливатели;
- виброкабестаны,
- с осевым отверстием или без него.

Одним из важнейших направлений повышения производительности труда при устройстве свайного фундамента вибропогружением является оптимальный выбор вибропогружателя свай.

В СНиП 3.02.01-87 «Земляные сооружения, основания и фундаменты» приведены основные условия выбора вибропогружателей свай. В данной статье приведены дополнительные критерии выбора вибропогружателей, предложенные на основе системного подхода [1,8].

Критерий IV-1: $F_0^{в} \geq F_0^{T}$,

где F_0 – вынуждающая сила вибропогружателя,

индексы: $в$ – возможная величина, T – требуемая величина.

Значение требуемой вынуждающей силы вибропогружателя F_0^T, кН, определяем по формуле:

$$F_0^T = \frac{F_d - K_{вс} G_{вс}}{k_s}, \quad (1)$$

при

$$k_s = \frac{k_{s,w} k_{s,гр}}{k_{s,ил} k_{s\rho}}, \quad (2)$$

где F_d – несущая способность сваи;

$K_{вс}$ – коэффициент условий вибропогружения свай (равный 2,8);

$G_{вс}$ – суммарный вес вибросистемы (вибропогружатель, свайный элемент и наголовник), кН;

k_s – коэффициент снижения бокового сопротивления грунта во время вибропогружения;

$k_{s,гр}$ – коэффициент влияния характеристик грунта, принимаемый по таблице 1 СНиП 3.02.01-87 (ориентировочно составляет: для песчаных влажных грунтов средней плотности при крупности от

гравелистых до мелких – 2,6…6,2; для глинистых грунтов с показателем текучести от 0 до 0,8 – 1,3…3,5);

$k_{s,w}$ – коэффициент влияния водонасыщения песков (крупные пески – 1,2; средние – 1,3; мелкие и пылеватые – 1,5);

$k_{s,ил}$ – коэффициент влияния заиления песков (для заиленных – 1,2);

$k_{s\rho}$ – коэффициент влияния плотности песков (для плотных – 1,2, для рыхлых – 0,9).

Критерий IV-2: $F_0^T \geq K_{TC_1} G_{вс}$,

где K_{TC_1} – коэффициент для трубосвай (1,3 – с извлечением грунта и 2,5 – без извлечения).

Критерий IV-3: $K_m^в \geq K_m^T$,

где K_m – статический момент массы дебалансов.

Здесь:

$$K_m^T = \frac{M_{вс} A_0^T}{K_{TC_2}}, \quad (3)$$

где $M_{вс}$ – суммарная масса вибропогружателя, сваи и наголовника;

K_{TC_2} – коэффициент для полых свай и свай-оболочек с извлечением грунта из внутренней полости (равный 1,2);

A_0^T – необходимая амплитуда колебаний при отсутствии сопротивления грунта, принимается по табл. 2 СНиП 3.02.01-87 (для грунтов от водонасыщенных песков и илов до гравелистых песков и твёрдых глин: от 0,7см до 1,4см при глубине погружения до 20 метров, от 0,9см до 1,6см при глубине погружения свыше 20 метров).

При окончательном выборе типа вибропогружателя следует учитывать, что при равной вынуждающей силе большей погружающей способностью обладает вибропогружатель с большим статическим моментом массы дебалансов K_m , а при прочих равных условиях следует выбирать вибропогружатель с регулируемыми в процессе работы параметрами.

Критерий IV-4: $v^в \geq v^T$,

где $v^в$ – возможная скорость вибропогружения;

v^T – требуемая скорость вибропогружения.

По мнению авторов, значение требуемой скорости вибропогружения v^T можно принять в пределах от 10см/мин до 20 см/мин.

Величину возможной скорости вибропогружения определяют по формуле (см/мин):

$$v_1^в = \frac{C_в \lambda}{30} - F_d \frac{C_в^{\,2}}{15(150N + G_{вс} C_в)}, \quad (4)$$

при

$$C_в = An, \quad (5)$$

где $C_в$ – характеристика вибрации;

A – половина размаха колебаний верха сваи, см;

n – число оборотов экцентриков в мин.;

λ – коэффициент, учитывающий отношение статического сопротивления грунта к динамическому при вибропогружении, согласно источнику [2] принимается: для песчаных грунтов – 2,0…6,8, для глинистых – 2,0...4,5; согласно источнику [3] принимается: для песков и супесей – 4,5…3,0 от водонасыщенных до маловлажных, для суглинков – 4,0…2,5, для глин – 3,0…2,0 при показателе текучести от 0,75 до 0,25;

N – полезная величина мощности, расходуемая на погружение сваи, кВт;

$G_{вс}$ – суммарный вес вибросистемы (вес сваи и вибратора с наголовником), т.

$$N = N_{дв}\eta_{дв} - N_x, \tag{6}$$

при

$$N_x = \varphi N_{паспорт}, \tag{7}$$

где $N_{дв}$ – полная потребляемая активная мощность в конце погружения, определяемая ваттметром, кВт;

$\eta_{дв}$ – КПД электродвигателя вибропогружателя (0,8 – 0,9 по [3]);

N_x – потребляемая мощность холостого хода;

φ – доля паспортной мощности (для низкочастотных вибропогружателей – 0,25);

$N_{паспорт}$ – паспортная мощность электродвигателя.

По другим формулам (например, по А.С. Головачеву):

$$v_2^в = \frac{612\ N - 0{,}4 F_d C_в \delta h_n}{F_d k_\sigma k_\tau - G_{вс} k_\tau (1 + \delta h_n)}, \tag{8}$$

где, кроме прежних обозначений,

$$\delta = \frac{U}{F}\frac{\tau^н}{\sigma^н}, \tag{9}$$

где U – периметр сечения сваи;

F – площадь поперечного сечения ствола сваи, м^2;

h_n – глубина погружения сваи;

значение амплитуды колебания можно определить по формуле:

$$A \le \frac{k_1(k_2 N - N_x)}{n\left(\frac{F_d}{k_3\lambda} - G_{вс}\right)}, \tag{10}$$

где k_1 – коэффициент, равный 153;

k_2 – коэффициент, равный 0,85;

k_3 – коэффициент, равный 0,7.

Значение возможной скорости вибропогружения $v^в$ также можно определить по обобщенной формуле, рекомендованной как для метода забивки, так и для метода вибропогружения, например по [3]:

$$v_3^в \le \frac{\eta F E_d}{\frac{F_d}{M}\left(\frac{F_d}{M} + \eta F\right)} \frac{Q_n + \varepsilon^2(q + q_1)}{Q_n + q + q_1}, \tag{11}$$

где $v_3^в$ – возможная скорость вибропогружения, см/мин;

η – коэффициент, тс/м^2, зависящий от типа сваи, согласно СНиП 3.02.01-87 [3] принимается: для железбетонных свай с наголовником – 150 тс/м^2; для деревянных – (80 – 100) тс/м^2; для стальных с наголовником – 500 тс/м^2;

E_d – расчетная энергия удара, тс*см, зависящая от величины вынуждающей силы и принимаемая в пределах от 450 тс*см до 3500тс*см соответственно для значений вынуждающей силы от10 тс до 80тс [3];

M – коэффициент, вводимый для метода вибропогружения, зависящий от вида грунта и принимаемый в пределах 0,7 -1,3 (меньшее значение соответствует глинистым грунтам, большее – гравийным) [3];

Q_n – полный вес вибропогружателя, тс;

ε – коэффициент восстановления удара, при применении вибропогружателей равен нулю;

q – вес сваи и наголовника, тс;

q_1 – вес подбабака, тс, при использовании вибропогружателя равен нулю.

Критерий IV-5: $\frac{1}{T_{чп}^в} \geq \frac{1}{T_{чп}^T}$,

где $T_{чп}^в$ – возможное значение чистого времени вибропогружения свай;

$T_{чп}^T$ - требуемое значение чистого времени вибропогружения свай.

Чистое время вибропогружения свай запишем в виде:

$$T_{чп} = \sum \frac{h_i}{v_i}, \qquad (12)$$

где h_i – толщина расчётного слоя;

v_i – среднее значение скорости погружения при прохождении сваей *i*-го слоя, определяемое по приведенным выше формулам возможных скоростей для различных глубин погружения свай.

Критерий IV-6: $П^{э^в} \geq П^{э^T}$.

Здесь $П^э$ – эксплуатационная производительность вибропогружения свай.

Основные положения по расчетам эксплуатационной производительности изложены в литературе [1,2,4,5,6,7,9,10,11,12].

Критерий V-1: $\sigma^в \leq \sigma^T$,

где σ – нормальные напряжения в поперечном сечении материала сваи в процессе вибропогружения.

$$\sigma^T = [\sigma], \qquad (13)$$

где $[\sigma]$ – допустимое нормальное напряжение.

При сжатии возможные нормальные напряжения определяем по формуле:

$$\sigma_c^в = \frac{F_0^в + G_{вс}}{F}, \qquad (14)$$

при растяжении – по следующей формуле:

$$\sigma_p^в = \frac{F_0^в - G_{вс}}{F}. \quad (15)$$

Критерий V-2: $\sigma_{раз}^в \le \sigma_{раз}^T$,

где $\sigma_{раз}$ – напряжение разрыва при вибропогружении, вызываемое явлением гидравлического удара жидкости, заполняющей внутреннюю полость оболочки во время вибропогружения.

Жидкостью может быть вода акватории и даже слабые грунты в текучем состоянии, например илы. Здесь возможные напряжения разрыва оцениваются специальными расчетами. Однако при применении различных технологических мероприятий, защищающих трубчатую сваю от явлений гидравлического удара, они могут быть снижены.

Выводы

1. В приведённой работе на основе системного подхода удалось расширить количество рассматриваемых параметров, и тем самым создать условия для оптимального выбора вибропогружателя.

2. Приведённые зависимости, по нашему мнению, в большей степени удовлетворяют требованиям удобства расчётов, их прозрачности и логичности, что достигалось, в том числе, частичной заменой эмпирических зависимостей на аналитические.

Литература

1. Булатов Г. Я. Введение в общую теорию технологий (на примере строительства). Учебное пособие. СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2003. 175 с.
2. Ясинецкий В. Г., Фенин Н. К. Организация и технология гидромелиоративных работ. М. : Агропромиздат, 1986. 352 с.
3. Справочник по строительству портов и гидротехнических сооружений / Под общей ред. Г.Н. Николаева. М. : Транспорт, 1972. 474 с.
4. Зерцалов М. Г., Хечинов Ю. Е., Корчагин Е. А., Жохов Е. И., Конюхов Д. С., Маньков А. В. Производство гидротехнических работ. Часть 2. Учебник для вузов. М. : Изд-во МГОУ, 2010. 394 с.
5. Tsinker Gregory P. Port engineering: planning, construction, maintenance and security. Harbors. Design and Construction. Printed in the USA : New Jersey, 2004. 881 p.
6. FOREVER (FOndation REnforcees VERticalement). Synthese des rezultates et recommendation du Projet national sur les MICROPIEUX. Paris. Ponts et chausses, 2004. 347 p.
7. Gerard Philipponnat, Bertrand Hubert. Fondation et ouvrages en terre. Paris : Eyrolles, 2008. 548 p.
8. Булатов Г. Я. Обобщенные критерии оптимального выбора технологий и машин // Инженерно-строительный журнал. 2009. №1. С. 32-39.
9. Телешев В. И., Ватин Н. И., Марчук А. Н., Комаринский М. В. Производство гидротехнических работ. Часть 1. Учебник для вузов. М. : Изд-во АСВ, 2010. 432 с.
10. Булатов Г. Я. К теории производительности строительных машин // Труды СПбГТУ. 2007. №502 (К 100-летию инженерно-строительного факультета). С. 129-138.
11. Булатов Г. Я., Терехов А. А. Численное моделирование производительности экскаваторов // Инженерно-строительный журнал. 2011. №2(20). С. 7-15.
12. Теличенко В. И., Терентьев О. М., Лапидус А. А. Технология строительных процессов. Учебник для вузов. Часть1. М. : Высшая школа, 2008. 392 с.

**Георгий Яковлевич Булатов, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7(812)297-59-49; эл. почта: bulatov.spbgpu@gmail.com

Сокращение площади строительной площадки за счет оптимизации графиков движения рабочих

К.т.н., доцент Т.Ф. Морозова,
магистр Тяньфу Хэ,
магистрант Е.М. Петрова*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: календарное планирование; строительный генеральный план; ресурсный график; оптимизация; выравнивание ресурсов; пиковые нагрузки; эвристический алгоритм

Основными организационно-технологическими документами, регламентирующими требования к строительному генеральному плану при строительстве жилищно-гражданских, сельских и промышленных объектов, являются проект организации строительства (ПОС) и проект производства работ (ППР) [1]. Эти документы разрабатываются на основании СНиП 12-01-2004 «Организация строительства», МДС 12-81-2007 «Организация строительства» и должны содержать мероприятия по наиболее эффективной организации строительства с использованием современных средств механизации и прогрессивных технологий строительного производства, способствующих улучшению качества, сокращению сроков и себестоимости работ.

ПОС и ППР обеспечивают не только высококачественное выполнение работ в заданные сроки, но и, что самое главное, безопасность строительства, поскольку содержат мероприятия по выполнению требований Технических регламентов в строительстве [2,3]. Поэтому наличие и использование в строительном производстве проектов организации строительства и проектов производства работ во многом предопределяют конкурентоспособность строительной организации [4,5].

В соответствии с МДС 12-81 -2007 проект организации строительства включает, в том числе, календарный план строительства и строительный генеральный план. Последний должен содержать:

- решения по организации следующих производственных процессов;
- санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования;
- инженерное обеспечение территории строительства, включающее средства коммуникаций;
- требования к безопасности.

Таким образом, при проектировании стройгенплана необходимо принимать решения по широкому кругу вопросов, которые в конечном итоге определяют технико-экономические показатели проекта организации строительства. На рис. 1 представлена блок-схема проектирования строительного генерального плана.

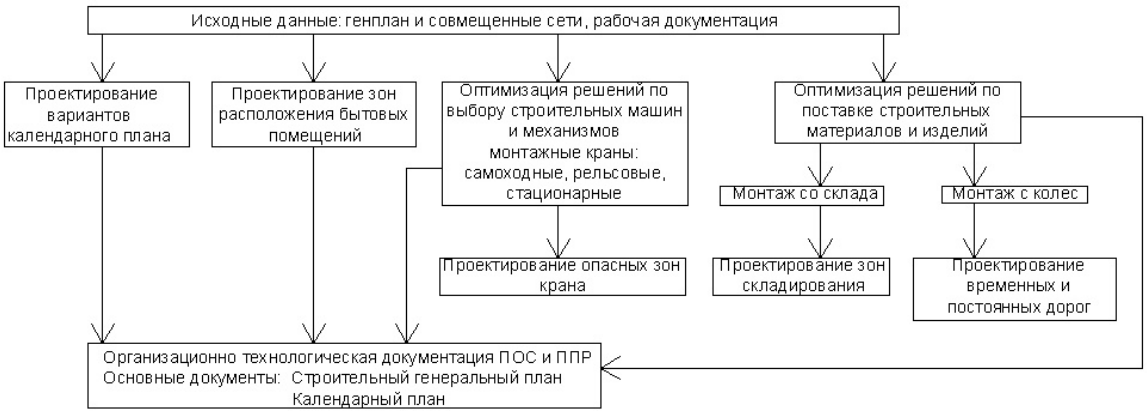


Рисунок 1. Блок-схема проектирования строительного генерального плана

Анализ норм размещения объектов строительного хозяйства при проектировании стройгенпланов [6,7] показывает достаточно сложную формализацию зависимости площади стройплощадки от конкретных параметров строительства. Поэтому подавляющее число научно-практических работ, ориентированных на поиск оптимальных решений в организации строительства, находится в сфере календарного планирования [8,9,10].

Одной из оптимизационных задач календарного планирования является опосредованная минимизация площади строительной площадки через минимизацию максимума графика движения рабочих [6]. В данной статье предлагается методика минимизации ресурсных пиков за счет вариации ресурсных профилей.

Задачи календарного планирования, целью которых являлось воздействие на график неравномерности использования ресурсов, ставились и решались ранее. При этом под распределяемыми ресурсами понимаются рабочие или проектировщики различных специальностей. Эти ресурсы обладают свойством возобновляемости и относятся к ресурсам второго рода (нескладируемых и возобновляемых). Предполагается, что каждая отдельная работа потребляет, как правило, один вид таких ресурсов. На интенсивность потребления ресурса определенного вида отдельной работой могут накладываться различные ограничения.

Каждому календарному плану реализации комплекса и каждому из распределяемых ресурсов соответствует функция, выражающая суммарную интенсивность потребления ресурса в каждый момент времени. Целевую функцию полагают «ступенчатой», т.е. постоянной на каждом элементарном промежутке времени (день, неделя, месяц и т.д.).

Количественный показатель неравномерности использования ресурса, является, как правило, средней оценкой. При необходимости учета двух и более видов ресурсов используются два способа.

В первом способе выравнивания сначала учитывают лишь один (в каком-то смысле наиболее важный) вид ресурса и оптимизируют его использование. Затем, фиксируя достигнутое значение показателя использования этого ресурса, переходят к учету следующего (в соответствии с принятым приоритетом). При этом выбирают календарные планы, оптимизирующие использование второго ресурса и не ухудшающие (или ухудшающие не более чем на заданную величину) показатель качества использования первого вида ресурса и т.д.

При втором способе выравнивания применяются «взвешенные» показатели качества использования всего множества учитываемых ресурсов. Оценка значимости отдельных видов ресурсов производится путем присвоения каждому из них некоторого числового параметра (весового множителя) и построения с помощью этих параметров единого показателя качества.

Критерий выравнивания загрузки ресурсов используется в программном комплексе MS Project. При автоматическом выравнивании загрузки Project выбирает задачи, выполнение которых следует задержать или прервать, учитывая при этом такие факторы, как идентификатор задачи, имеющийся временной резерв, приоритет задачи, зависимости задачи, ограничения задачи, плановые даты.

Критерий выравнивания загрузки ресурсов с помощью комплекса MS Project соответствует целям календарного планирования на стадии стройгенплана.

Практика производства строительных работ показывает, что многие работы могут производиться с разной интенсивностью или разным набором профилей ресурсов в MS Project.

Как показано в исследовании [6], вариации профилей ресурсов позволяют снизить пиковые значения ресурсных профилей. При этом предлагается алгоритм полного перебора возможных профилей ресурсов для работ, составляющих пиковые нагрузки. Для целей практического проектирования календарных планов и графиков движения рабочих в составе ПОС нами предлагается эвристический алгоритм перебора профилей ресурсов для пиковых нагрузок, основанный на методах статистического моделирования. Алгоритм предполагает перебор ограниченного числа вариантов и выбор лучшего по критерию пиковых значений ресурсов. Применение алгоритма позволяет найти приемлемое решение за короткое время.

Примем интенсивности работ (профили загрузки) L переменными поставленной задачи.

Исследование вариации профилей загрузки в целях снижения пиковых значений, выполненных в работе [6], показали, что целесообразно использовать четыре профиля – загрузка в начале, загрузка в конце, черепаха, плоский. Пусть профиль обозначается следующим образом:

$$L = \begin{Bmatrix} 1 - \text{профиль "загрузка в начале"} \\ 2 - \text{профиль "загрузка в конце"} \\ 3 - \text{профиль "черепаха"} \\ 4 - \text{профиль "плоский"} \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

Пусть ζ – случайная величина, равномерно распределенная в промежутке $[0;1]$.

Полагаем:

$$L = \begin{cases} 1, если\ \zeta \in [0;1/4] \\ 2, если\ \zeta \in [1/4;2/4] \\ 3, если\ \zeta \in [2/4;3/4] \\ 4, если\ \zeta \in [3/4;1] \end{cases}. \quad (2)$$

Эффективность изменения интенсивности оценивается путем расчета и сравнительного анализа вариантов при различных значениях интенсивности тех или иных работ. Методика выравнивания ресурсных пиков для календарных планов в составе стройгенплана:

1) определение ресурсного пика работ при стандартном (заданном по умолчанию) плоском профиле ресурсов;
2) применение к полученному на первом шаге календарному плану стандартной процедуры MS Project выравнивания загрузки ресурсов;
3) определение строительных работ ресурсного пика;
4) оценка ресурсного пика графика движения рабочих;
5) осуществление перебора профилей ресурсов по формуле (2).

Рассчитывается 20 вариантов календарных планов и выбирается лучший по критерию:

$$R_{пик} \to \min, \quad (3)$$

где $R_{пик}$ представляет сумму работ (r), образующих ресурсный пик в зависимости от принятых ресурсных профилей L.

В результате работы алгоритма получим множество различных расписаний. Вычисляемое для каждого такого расписания значение функции $R_{пик}$ – минимальной загрузки используемых ресурсов – служит критерием, по которому следует сравнивать полученные расписания.

Результаты расчета календарного плана с вариацией ресурсных профилей по предложенному алгоритму и методике на примере бизнес-центра представлены на рис. 2-5.

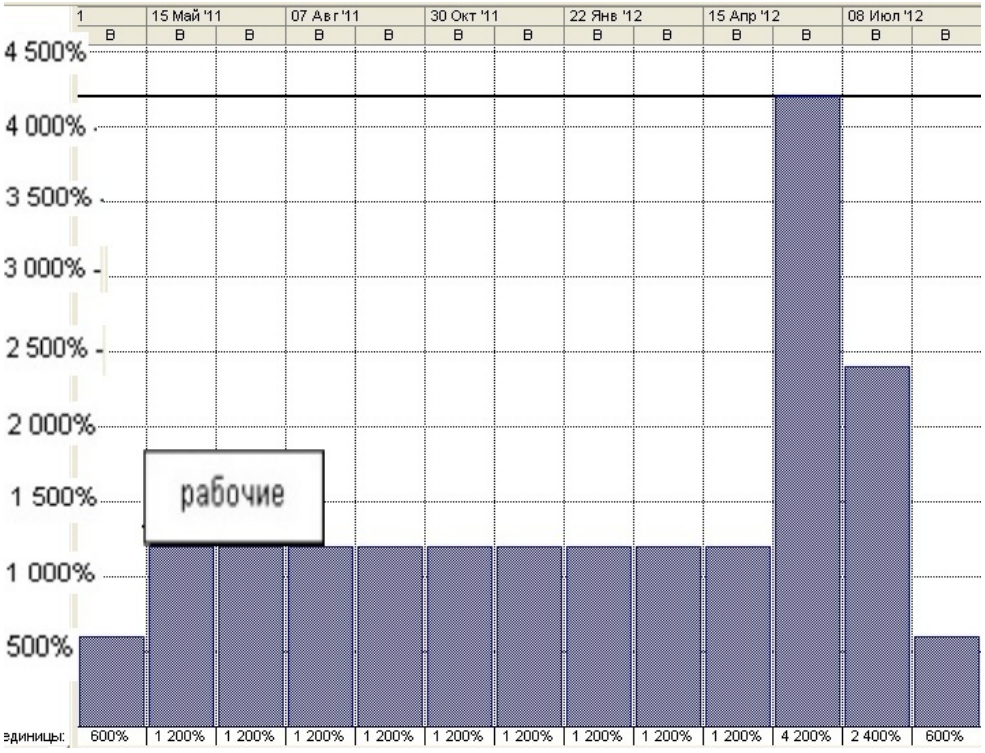


Рисунок 2. Неоптимизированный график движения рабочих при расчете по методу критического пути (МКР)

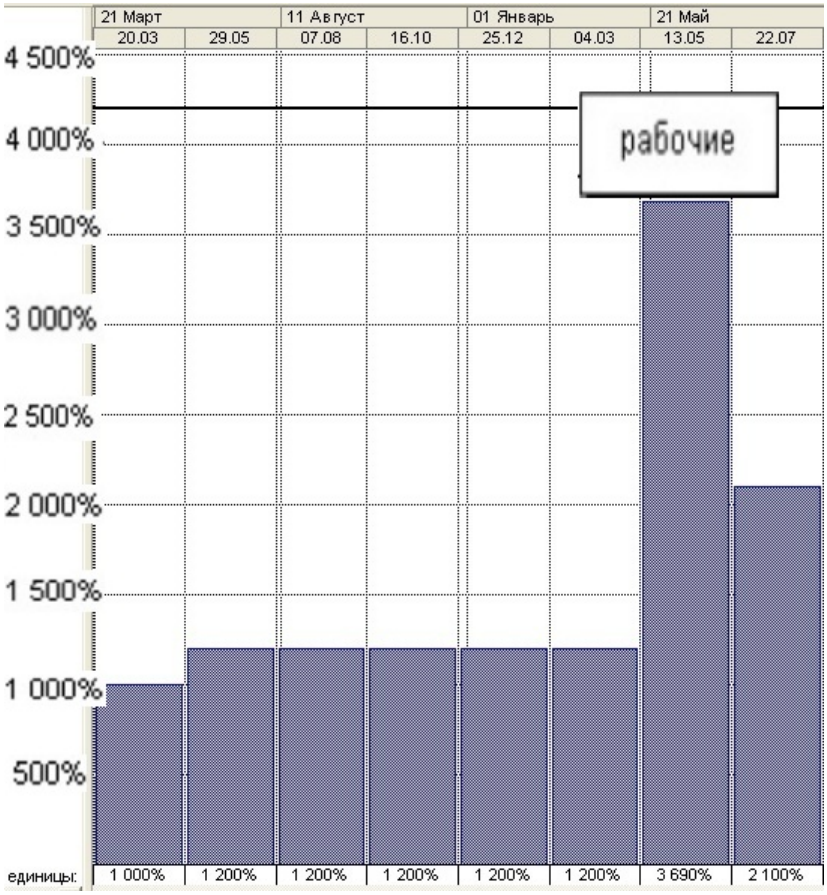


Рисунок 3. Оптимизированный график движения рабочих при методе МКР

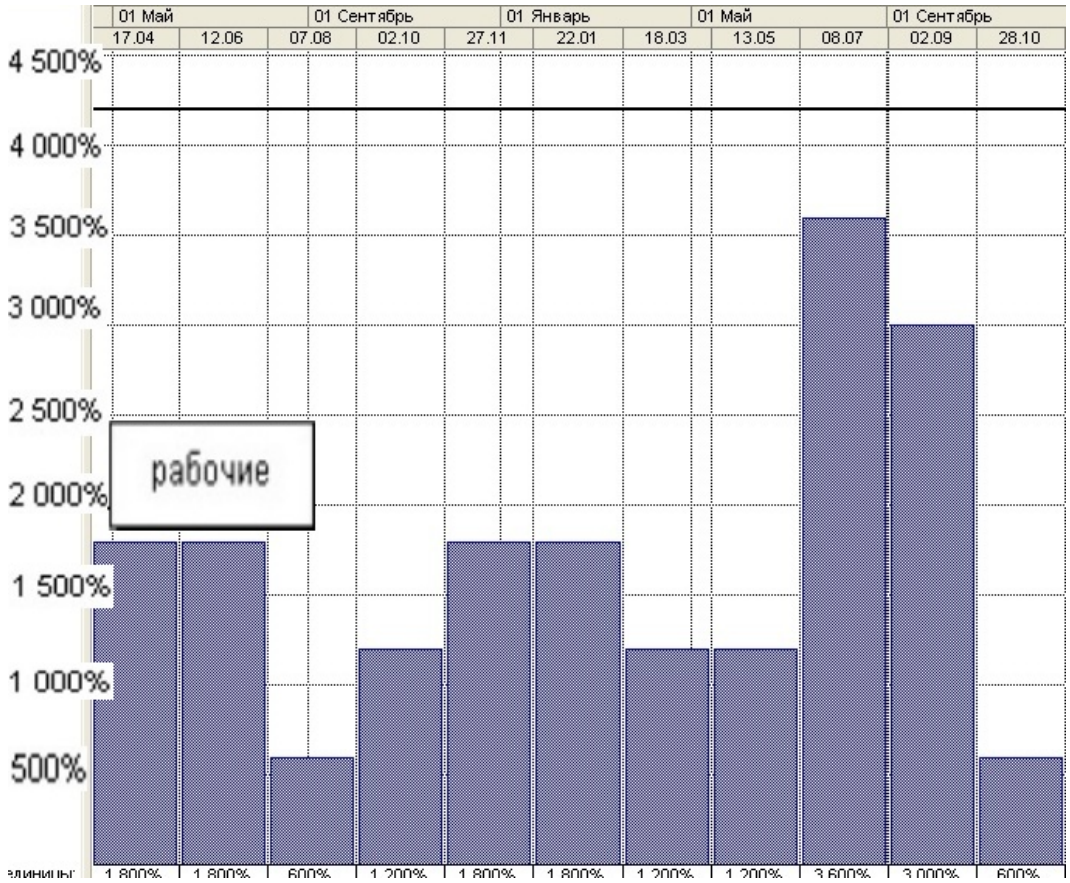


Рисунок 4. Неоптимизированный график движения рабочих при расчете по методу непрерывного использования ресурсов (НИР)

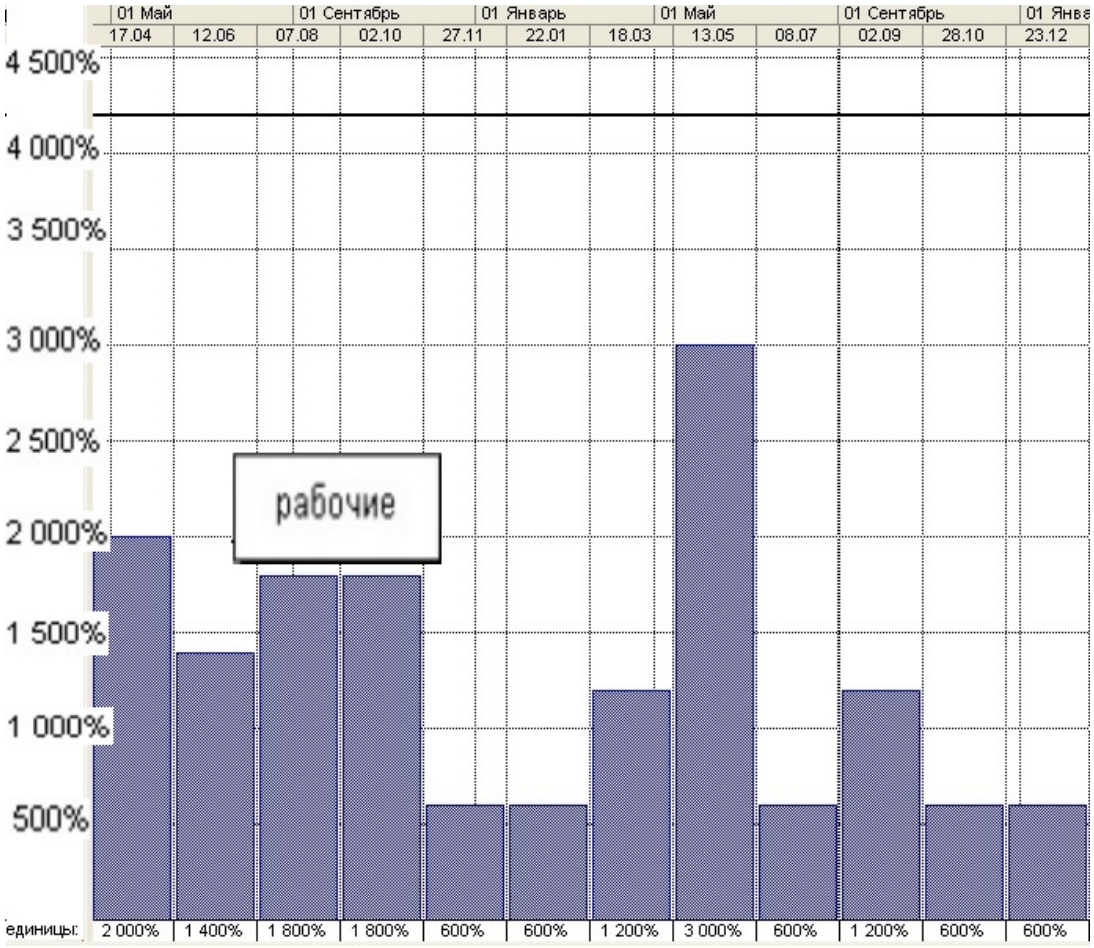


Рисунок 5. Оптимизированный график движения рабочих при методе НИР

Результаты расчета 20 вариантов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчета

№ варианта	Величина ресурсного пика по методу МКР	Величина ресурсного пика по методу НИР
1	42	35
2	41	31
3	42	31
4	37	30
5	41	35
6	42	35
7	37	30
8	40	35
9	41	35
10	41	30

Использование методики и алгоритма вариации профилей ресурсов позволило снизить пиковые нагрузки в календарном плане, построенном методом с критического пути, на шесть человек, а в календарном плане, построенном методом непрерывного использования ресурсов, на пять человек. Это составляет примерно 10% от первоначального неоптимизированного ресурсного пика.

Определим число сокращаемых ресурсов и связанную с ним денежную экономию на основании данных примера:

$$R=R_{нач}-R_{опт}, \quad (4)$$

где $R_{нач}$ – начальный (дооптимизационный) ресурсный пик;
$R_{опт}$ – оптимизированный ресурсный пик.

Средняя потребность во временных зданиях и сооружениях составляет 1.8 кв. м/чел.

Сокращение ресурсного пика на 10% привело к сокращению временных административно-бытовых зданий на 11 кв.м. Принимаем аренду земли согласно [7] 22000 руб./м^2.

Исключая полученную площадь из арендуемой на строительство площади, получаем оценку экономического эффекта на данный объект:

$$11м^2 \cdot 22000(м^2 / год) \cdot 2года = 484000руб./объект.$$

Выводы

1. Предложен эвристический алгоритм и методика минимизации ресурсных пиков за счет вариации ресурсных профилей, включающая режим диалога и компьютерные технологии MS Project.
2. Снижение пиковых нагрузок позволит минимизировать площадь строительной площадки и приведет к экономии ресурсов.
3. На примере конкретного объекта получены оптимизированные графики движения рабочих и рассчитан экономический эффект.

Литература

1. Дикман Л. Г. Организация строительного производства. М. : АСВ, 2003. 512 с.
2. Асаул А. Н., Барановская Н. И. Экономика строительства. М. : АСВ, СПбГАСУ, 2004. 175 с.
3. Бовтеев С. В., Еременко В. П. Управление проектами в строительстве: Учеб. пособие / СПбГАСУ. СПб., 2004. 424 с.
4. Богданов В. В. Управление проектами в Microsoft Project: учебный курс. СПб. : Питер, 2003. 640 с.
5. Kahkonen K. Project Management Software Packages-Exam – pies from Recent Trends and Developments // Project Management. 1995. Vol.18, No.3. Pp. 18-20.
6. Болотин С. А. Анализ потенциальных возможностей проектирования оптимального строительного генерального плана // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2008. №4. С. 30-33.
7. Малкин М. М. Оптимизация графика движения рабочих в календарных планах методом вариации ресурсных профилей: дис. канд. техн. наук: 05.23.08. Санкт-Петербург. 2010 .149 с.
8. Абдуллаев Г. И. Влияние организационно-технологических факторов на эффективность управления строительством сооружений // Инженерно-строительный журнал. 2011. №2. С. 52-54.
9. Заренков В. А. Управление проектами. М. : АСВ, 2006. 312 с.
10. Виленский П. Л., Лившиц В. Н. Оценка эффективности инвестиционных проектов. Теория и практика. М. : Дело, 2001. 832 с.

** Елена Михайловна Петрова, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. моб.: +7(904)616-82-04; эл. почта: elen_p88@mail.ru

Имитация календарного планирования в программах информационного моделирования зданий и регрессионная детализация норм продолжительностей строительства

Д.т.н., профессор С.А. Болотин;
к.т.н., докторант А.Х. Дадар,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет;
старший преподаватель И.С. Птухина*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: нормы продолжительности; регрессивные зависимости; оценка экономической эффективности; стоимость виртуальной продажи

В настоящее время прогресс инструментального обеспечения архитектурно-строительного проектирования связан с интеграцией его разделов в единую систему, построенную на технологии информационного моделирования зданий (BIM технология). По этой технологии работают такие программные продукты как ArchiCAD фирмы Graphisoft, Allplan компании Nemetschek и Revit Architecture компании Autodesk [1,2]. Эти программные продукты позволяют проектировщикам объединить и автоматизировать основные этапы разработки проектной и рабочей документации. Пример такого рационального объединения, заключающегося в дополнении архитектурно-строительного проектирования сметными расчетами, можно найти в работе [3].

В данной статье будет рассматриваться дополнение к базовой платформе Revit – программа Autodesk Navisworks, которая, используя средства визуализации и процедуры генерирования различных сценариев, позволяет повысить технологичность планирования проекта и оптимизировать графики выполнения строительных работ. При этом логистика строительных работ моделируттся в формате 4D, в котором четвертое измерение определяет время в календарном плане работ. Это позволяет более четко демонстрировать реализацию проекта, бороться с простоями и проблемами, связанными с ошибками в планировании, а также обеспечивает ресурсосбережение на этапе строительства. Формат графика Ганта (в отечественной терминологии это линейный календарный график, представленный в модуле TimeLiner) позволяет визуализировать графики строительных работ в различных режимах отображения (план, текущее положение дел и сопоставление двух режимов). Динамическая связь с приложениями сторонних разработчиков дает возможность использовать в интегрированной модели данные из таких систем управления проектами как Microsoft Project или Primavera [4,5].

Тем не менее, на данный момент развитие программ типа Autodesk Navisworks тормозится отсутствием адекватной информационной базы календарного планирования. В том числе, это связано с недостаточностью принятых на данный момент нормативов продолжительности строительства. В данной статье авторами предлагается механизм определения продолжительностей циклов работ для жилых зданий.

Принятые Министерством регионального развития РФ в конце 2010 г. нормативы определяют продолжительности только двух периодов строительства – подготовительного и основного, а этого явно недостаточно для календарного планирования продолжительностей работ нулевого цикла, возведения надземной части здания и его внутренних работ даже при достаточно укрупненном календарном планировании, осуществляемом в составе проекта организации строительства (ПОС). Количество конкретных норм, представленных в приложении к анализируемому документу [6], для некоторых типов зданий явно недостаточно. Поэтому в текстовой части документа законодатель рекомендует применение экстраполяционно-интерполяционных процедур, основанных, в частности, на использовании проектов аналогов.

В этом отношении наиболее репрезентативным собранием проектов-аналогов является «старый» СНиП 1.04.03-85* «Нормы продолжительности строительства и задела в строительстве предприятий, зданий и сооружений», не действующий в настоящее время. Однако его ценность, с точки зрения применения экстраполяционно-интерполяционных процедур, заключается в использовании большого статистического материала по продолжительностям и стоимостям основных циклов строительства. Например, только для кирпичных, монолитных и крупнопанельных зданий с этажностью от 5 до 25 этажей в «старом» нормативе представлено 74 нормы, которые получены на основе статистической обработки большого числа проектов-аналогов. Вместе с этим в работе [6] в качестве нормативов представлены данные конкретных объектов-аналогов с их индивидуальными характеристиками. Например, в нормативе приводится конкретное монолитное 24-х этажное здание общей площадью 20033 м2, возведенного на свайном фундаменте и монолитной ж/б плите, и для него устанавливается общая продолжительность строительства 20 месяцев, включающая продолжительность подготовительного периода 1 месяц.

С целью расширения информационной базы проектирования организации строительства, а также с целью достижения преемственности в данном виде нормотворчества авторами предлагается следующий механизм определения продолжительностей циклов работ для жилых зданий.

С учетом современной типологии жилых зданий, с числом этажей 5 и более, по СНиП 1.04.03-85* в качестве исходных статистических массивов взяты нормы по следующим типам зданий: монолитные (27 норм), кирпичные (20 норм) и панельные (27 норм). В «старых» и новых нормах, кроме типа здания указываются следующие количественные характеристики: общая площадь и число этажей, поэтому определение структуры продолжительностей по каждому типу зданий как раз и должно зависеть от этих количественных характеристик. В качестве примера рассмотрим нормативную статистику кирпичных зданий, представленную в табл.1.

Анализируя структуру продолжительностей основных циклов работ, приходим к следующим выводам. Для подготовительного периода всех типов зданий как в «старом» СНиПе, так и в новом нормативе отводится 1 месяц. Считаем, что продолжительность работ нулевого цикла (НЦ) регрессионно зависит от общей площади здания, так именно она определяет основную нагрузку на основание и фундамент здания. Аналогичный вид регрессионной зависимости может быть принят и для аппроксимации отделочных работ (Отд), объем, продолжительность которых также линейно связана с общей площадью здания. В регрессионную зависимость продолжительности работ по надземной части (НЧ) здания следует добавить учет его этажности исходя из следующей логики. Можно считать, что продолжительность работ по каждому последующему этажу будет возрастать на некоторую постоянную величину по сравнению с предыдущим этажом. Тогда суммируя добавки по всем этажам и ограничиваясь старшей степенью получаемого выражения, принимаем, что общая добавка будет пропорциональна квадрату числа этажей здания.

В результате обработки статистического массива, представленного в табл.1, получены следующие регрессионные зависимости.

$$T^{к}_{НЦ}=0.885+0.000067\cdot F,$$
$$T^{к}_{НЧ}=2.622+0.000418\cdot F+0.00284\cdot N^2, \qquad (1)$$
$$T^{к}_{Отд}=1.505+0.000047\cdot F.$$

Проверка зависимостей (1) показала, что с учетом округления с дискрецией в 0.5 месяца, полное совпадение достигнуто для нулевого цикла в 65% случаев, для наземной части в 30% и для цикла отделочных работ в 85% случаев, а при расхождении в 0.5 месяца и менее достигнуто в 100% всех случаев.

По результатам обработки статистических массивов монолитных и панельных зданий получены регрессионные зависимости, представленные в табл.2.

Таблица 1. Нормативная статистика кирпичных зданий [6].

№ п/п	N	F, м^2	T, мес	В том числе по циклам				Процентное распределение стоимости			
				Подго-товка	Нулевой цикл	Надзем. часть	От-делка	Подго-товка	Нулевой цикл	Надзем. часть	От-делка
1	5	1500	6.5	1	1.0	3.0	1.5	7	9	63	21
2	5	2500	7.0	1	1.0	3.5	1.5	7	7	67	19
3	5	4000	8.0	1	1.0	4.5	1.5	7	11	66.5	15.5
4	5	6000	9.0	1	1.0	5.5	1.5	6	11	75	8
5	9	3000	8.0	1	1.0	4.5	1.5	9	15	64.5	11.5
6	9	6000	10.0	1	1.5	5.5	2.0	7	19.5	58.5	15
7	9	8000	11.0	1	1.5	6.5	2.0	5	12.5	65.5	17
8	9	10000	12.0	1	1.5	7.5	2.0	5	12.5	69.5	13
9	9	12000	12.5	1	1.5	8.0	2.0	5	3.5	78	13.5
10	10	3500	8.0	1	1.0	4.5	1.5	9	15	64.5	11.5
11	10	7000	9.5	1	1.0	5.5	2.0	6	4	75	15
12	10	9000	10.5	1	1.5	6.0	2.0	6	6	72.5	15.5
13	10	11000	11.5	1	1.5	7.0	2.0	6	3.5	77	13.5
14	10	13000	12.5	1	1.5	8.0	2.0	5	3.5	78	13.5
15	12	4000	9.5	1	1.5	5.0	2.0	6	6.5	68.5	19
16	12	8000	10.5	1	1.5	6.0	2.0	6	6	72.5	15.5
17	12	12000	13.5	1	2.0	8.5	2.0	6	4	79	11
18	14	5000	9.5	1	1.5	5.0	2.0	6	6.5	68.5	19
19	14	8000	11.0	1	1.5	6.5	2.0	5	12.5	65.5	17
20	14	12000	13.5	1	2.0	8.5	2.0	6	4	79	11

Примечание. N – число этажей, F – общая площадь, T – норма продолжительности.

Таблица 2. Регрессионные уравнения по продолжительностям циклов работ, выполняемых при строительстве жилых зданий

Тип здания	Цикл работ	Св. член	Коэфф. при F	Коэфф. при N^2	P при Δ =0.5
Кирпичное	Нулевой цикл	0.885	0.000067		1.00
	Надземная часть	2.622	0.000417	0.00284	1.00
	Цикл отделки	1.505	0.000047		1.00
Монолитное	Нулевой цикл	0.570	0.000106		0.71
	Надземная часть	3.041	0.000364	0.00354	0.77
	Цикл отделки	0.837	0.000118		0.85
Панельное	Нулевой цикл	0.856	0.000049		1.00
	Надземная часть	2.284	0.000168	0.00265	0.81
	Цикл отделки	0.872	0.000049		0.97
Кирпично-монолитное	Нулевой цикл	0.684	0.000093		
	Надземная часть	2.863	0.000384	0.00340	
	Цикл отделки	1.101	0.000093		

Результаты сравнения показали, что вероятность (P) отклонения продолжительности, рассчитанной по полученным регрессионным уравнениям, от данных нормативной статистики, определенная порогом в 0.5 месяца и менее, составила более 71%.

По отношению к данным СНиП, которые, в основном, соответствовали статистике, полученной до 1990 г., в современном строительстве жилых зданий получили распространение кирпично-монолитные дома. Для регрессионного описания продолжительностей основных циклов работ по этим зданиям нами объединена статистика по кирпичным и монолитным домам и на основе этого объединения получены соответствующие регрессионные уравнения. Очевидно, что ввиду отсутствия собственно кирпично-монолитных зданий в «старом» СНиП невозможно провести вероятностное сравнение результатов полученной обработки.

Рассмотрим другой критерий адекватности предлагаемых регрессионных уравнений, основанный на анализе чувствительности оценки экономической эффективности проекта к вариации структуры продолжительностей отдельных циклов работ [7,8,9,10]. Следуя методическим рекомендациям работы [11], считаем, что преимущественно оценка экономической эффективности проекта осуществляется через расчет показателя, получившего название чистый дисконтированный доход. Однако его вычисление связано с количественной информацией о доходном периоде строящегося объекта, которая, особенно на ранней стадии проектирования, может отсутствовать. Данное ограничение можно обойти, если воспользоваться расчетом показателя, получившего название минимальная стоимость виртуальной продажи [12].

По определению, минимальной стоимостью виртуальной продажи (*VS*) является стоимость возможной продажи объекта, при которой его застройщик получает заданный им процент дохода на инвестированный в объект капитал [13]. Рассчитывается данный показатель по формуле [14]:

$$VS = \int_0^T (1+E)^{T-t} c(t)dt\,, \qquad (2)$$

где *T* – норма продолжительности строительства;
E – норма дохода на инвестируемый капитал;
c(t) – распределение капитальных вложений по времени.

По своей сути формула (2) представляет собой дисконтирование инвестиций к концу периода строительства. Очевидно, что по формальному признаку дисконтирование инвестиций к начальному моменту строительства (*NPI*) также может служить критерием оценки в анализе чувствительности проекта к вариации структуры продолжительностей отдельных циклов работ. В этом случае расчетный показатель будет соответствовать формуле [14]:

$$NPI = \int_0^T (1+E)^{-t} c(t)dt\,. \qquad (3)$$

Методика анализа чувствительности сводилась к следующему. В качестве стоимости работ по основным циклам принято нормативное распределение, представленное данными последних 4-х столбцов табл. 1. В качестве продолжительностей циклов работ использовались нормативные данные и продолжительности, рассчитанные по полученным регрессионным формулам, представленным в табл. 2. Сравнение проводилось по показателям, рассчитанным в соответствии с формулами (2) и (3), а результаты сравнения показали, что расхождение оценок эффективности не превышает одного процента. Для примера приведем данные расчета показателей эффективности по 9-тиэтажному монолитному зданию общей площадью 12000 м^2, для которого расхождение продолжительностей для каждого цикла составила 1 месяц, что отражает самый неблагоприятный случай. Минимальная стоимость виртуальной продажи для нормативного распределения продолжительностей равна 104.9%, для регрессионного – 104.8%, а дисконтированные к началу инвестиции для нормативного распределения продолжительностей составили 80.7%, для регрессионного – 80.6%. Этот результат подтверждает совпадение оценок.

Таким образом, можно утверждать, что предлагаемые регрессионные зависимости, по которым определяются продолжительности основных циклов работ, без существенной погрешности могут быть использованы в совместном архитектурно-строительном и организационно-технологическом проектировании для интегральной оценки проектных решений на ранних стадиях проектирования [15]. Однако при этом следует учесть, что регрессионно рассчитанные суммы продолжительностей отдельных циклов работ могут не совпадать с новыми нормативами. Поэтому с целью исключения возможного расхождения необходимо использовать следующую нормирующую методику.

По регрессионным выражениям, представленным в табл. 2, можно рассчитать относительные доли продолжительностей основных циклов работ в общей продолжительности строительства так, что общая относительная продолжительность будет равна единице. В этом случае обратным пересчетом можно определить откорректированные абсолютные продолжительности основных циклов работ.

Возвращаясь к вопросу об интеграции архитектурно-строительного проектирования и календарного планирования, осуществляемой на основе использования BIM-технологий, можно для каждого проектируемого конструктивного элемента указать его стоимость и необходимую стадию его создания, что даст принципиальную возможность проведения экономической оценки всего здания в любой момент его проектирования. В результате у проектировщиков будет постоянный инструмент оценки принимаемых решений, позволяющий оперативно осуществлять мониторинг в течение всего этапа проектирования. Предложенная методология описана на примере организационного проектирования жилых зданий, однако она может быть практически применена ко всем типам строительных объектов.

Литература

1. Криницкий Е. В. Информационная модель здания (BIM) // Инженерно-строительный журнал. 2010. №2. С. 16-18.
2. Read Phil, Krygiel Eddy, Vandezande James. Autodesk Revit Architecture 2012 Essentials, SYBEX. 2011. 400 p.
3. Васильев П. П. ArchiCAD 10. Сметные расчеты. СПб. : «БХВ-Петербург», 2008. 240 с.
4. Куперштейн В. И. MS Office и Project в управлении и делопроизводстве. СПб. : БХВ-Петербург, 2003. 480 с.
5. Воропаев Д. В. Управление проектами в России. М. : Атлас, 1995. 225 с.
6. Нормативы продолжительности строительства. Утверждены приказом Министерства регионального развития Российской Федерации от 21 декабря 2010 г. № 746.
7. Болотин С. А., Дадар А. Х., Климов С. Э. Управление инвестиционными строительными проектами. Кызыл : Изд-во ТывГУ, 2004. 152 с.
8. Афанасьев В. А. Поточная организация строительства. Ленинград : Стройиздат, 1990. 160 с.
9. Walker Anthony. Project management in constructon / 4th ed. Oxford: Blackwell Science, 2002. 289 p.
10. Hendrickson Chris. Project Management for Construction: Fundamental Concepts for Owners, Architects and Bilders. 2003. 537 p.
11. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования. М. : Экономика, 2000. 421 с.
12. Болотин С. А. Оценка строительства социальных объектов по минимальной стоимости виртуальной продажи // В кн.: Оценочные технологии в экономических процессах. СПб. : Инжэкон, 2002. С. 148–151.
13. Птухина И. С. Методика распределения экономической ответственности исполнителей за задержку окончания строительства // Научный журнал КубГАУ. 2011. №68(04). [Электронный ресурс]. URL: http://ej.kubagro.ru/2011/04/pdf/35.pdf.
14. Болотин С. А., Гугина Ю. Б., Крылов Н. Г. Системная декомпозиция формулы расчета чистого дисконтированного дохода // Известия вузов. Строительство. 2002. № 8. С. 44-47.
15. Болотин С. А., Дадар А. Х. Конвергенция организационно-технологического и архитектурно-строительного проектирования, ориентированного на энергоресурсосбережение при строительстве и эксплуатации зданий / СПбГАСУ. Спб. , 2011. 200 с.

**Ирина Станиславовна Птухина, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7(812)297-59-49; эл. почта: irena_ptah@mail.ru

Упорядочение рабочих операций простых технологических процессов в строительстве

К.т.н, доцент М. М. Калюжнюк*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет;
учащийся А. В. Калюжнюк,
ГОУ лицей 572

Ключевые слова: рабочая операция; простой технологический процесс; организационно-технологический модуль; метод теории графов; экспертное оценивание; сетевое планирование и управление

Введение

В современных планах развития экономики Российской Федерации предусматривается в ближайшие годы достижение ею уровня передовых развитых стран благодаря всесторонней поддержке приоритетных направлений развития науки [1,2] и внедрению критических технологий [2] во все отрасли хозяйства.

В строительной отрасли, как и во всей экономике, также следует ожидать существенных преобразований [3]. В этих преобразованиях должна быть предусмотрена, в частности, автоматизация системы организационно-технологической подготовки строительного производства, основной частью которой является оперативно-производственное планирование.

Для осуществления полномасштабной автоматизации, повышения эффективности, надёжности и достоверности календарного планирования и управления строительством требуется адаптировать к современному уровню использовавшиеся ранее средства календарного планирования и дополнить их разработкой и внедрением новых математических методов, компьютерных и телекоммуникационных технологий.

Поскольку в силу специфических особенностей строительство в своём развитии почти всегда с некоторым запаздыванием следует направлениям, по которым развивается промышленность, при решении этих задач следует учитывать передовой опыт автоматизации систем организационно-технологической подготовки промышленного производства и оперативно-производственного управления технологическими процессами, ориентируясь на развитые мировые экономики [4 и др.].

Автоматизацию подготовки строительного производства авторы предлагают выполнять по следующим направлениям:

- структурно-функциональное моделирование строительных процессов [5,6], в котором предусматривается разделение общей организационно-технологической модели возведения объекта на взаимосвязанные структурную и функциональную модели;
- формализация методов упорядочения структурных моделей процессов возведения объектов и их базовых структурных единиц – простых технологических процессов [6];
- разработка формализованных методов упорядочения рабочих операций, входящих в состав простых технологических процессов, и на их основе формирование организационно-технологических модулей (см. ниже), наиболее значимыми характеристиками которых являются нормы затрат труда и/или машинного времени их исполнителей;
- разработка автоматизированных систем формирования и поддержания в актуальном состоянии характеристик организационно-технологических модулей простых технологических процессов и, в первую очередь, баз данных норм затрат труда (или выработки) и машинного времени (или производительности), служащих основой оперативно-производственного планирования и управления;
- разработка функциональных моделей возведения объектов – оптимизационных и субоптимизационных методов и алгоритмов вариантного календарного планирования работы трудовых и/или технических ресурсов (включая вспомогательные, сопутствующие, транспортные и другие обслуживающие процессы) на проектируемых объектах.

Из этих направлений первоочередным является решение задач формализации методов упорядочения рабочих операций, входящих в состав организационно-технологических модулей простых технологических процессов производства строительно-монтажных работ. В результате оказывается возможным получить для каждого организационно-технологического модуля нормы затрат труда и/или машинного времени на производство единицы продукции, использовать эти нормы в разработке календарных планов производства работ, совершенствовать организацию работы трудовых и/или технических ресурсов и тем самым повышать производительность их труда. Естественным продолжением этого направления должна являться разработка автоматизированных систем формирования и поддержания в актуальном состоянии баз данных характеристик организационно-технологических модулей простых технологических процессов, необходимых для функционирования систем автоматизированного календарного планирования и оперативно-производственного управления возведением объектов.

Следует отметить, что применение в техническом нормировании формализованных методов упорядочения организационно-технологических модулей позволит повысить надёжность и эффективность оперативно-производственного планирования в организациях, использующих программы управления проектами (MS Project, Spider Project, Primavera и др.) и в особенности в тех из них, которые только приступают к их освоению.

До 1990 года в неавтоматизированном режиме решение задач по указанным выше двум направлениям во всесоюзном масштабе осуществлялось в системе специализированных организаций, включающей ОРГТЕХСТРОИ, нормативно-исследовательские лаборатории и станции, подразделения НИИ отраслевых строительных министерств и др. под общим научно-методическим руководством ВНИПИ труда в строительстве. Каждая на своём уровне эти организации разрабатывали, распространяли и обновляли общесоюзные (ЕНиР), ведомственные (ВНиР) и местные (МНиР, предназначавшиеся для отдельных предприятий) нормы затрат труда и машинного времени на производство соответствующих видов работ.

С начала 90-х годов ЕНиР утратили силу обязательных нормативных документов и перестали разрабатываться и обновляться, тем самым технологические процессы, в которых используются новые материалы, конструкции, техника и технологии остались без единого нормативного обеспечения, и календарное планирование практически повсеместно ведётся на основе опыта и интуиции разработчиков.

В настоящей работе описан формализованный подход к формированию организационно-технологических модулей простых технологических процессов и определению их нормативно-технических характеристик, в первую очередь, норм затрат труда и/или машинного времени исполнителей простых технологических процессов (ресурсов-модулей) [5]. Применение этого подхода проиллюстрировано на примере устройства сварных соединений сборных железобетонных конструкций. Формализация методов упорядочения рабочих операций и определения нормативно-технических характеристик организационно-технологических модулей выбранного простого технологического процесса произведена на основе принципов экономии труда и времени, предложенных ещё в конце XIX в. Ф.У. Тейлором [7].

С помощью этих методов, используя современный уровень развития IT-технологий, оказывается возможным восстановить систему технического нормирования СМР в виде программных средств, доступных для использования в каждой строительной организации. Такая система позволит разрабатывать индивидуализированные для каждого ресурса-модуля нормы времени (или выработки), что даст возможность проводить мониторинг работы каждого ресурса-модуля, оценивать его производительность и разрабатывать рекомендации по повышению уровня организации их работы.

Следует заметить, что в современных научных публикациях, посвящённых календарному планированию строительных работ, авторами не найдено работ, касающихся формализации методов технического нормирования и использования в календарном планировании норм, детализированных до уровня простых технологических процессов и тем более до рабочих операций. В лучшем случае недостаточная степень детализации норм и связанные с этим отклонения фактических графиков производства работ от планируемых учитываются в календарном планировании путём применения вероятностных оценок временных характеристик работ, как это сделано в [8, 9 и др.].

Структурно-функциональное моделирование строительных процессов

Структурно-функциональное моделирование в применении к процессам возведения объектов [6] основывается на принципе разбиения традиционных [10, 11 и др.] организационно-технологических моделей возведения объектов на взаимосвязанные структурную и функциональную составляющие – модель пространственно-технологической структуры [5, 6] и функциональную модель процесса возведения объекта [6].

Модель пространственно-технологической структуры формируется из принятых за базовые простых технологических процессов, элементы которых, как введено в работе [5], состоят из ресурсов-модулей, фронтов-модулей и работ-модулей. Ресурс-модуль представляет собой минимальный трудовой и/или технический ресурс простого технологического процесса, который выполняет работу (работу-модуль) объемом, равным его сменной выработке, и занимает необходимое для выполнения этой работы рабочее пространство – фронт-модуль. Эти элементы составляют в своей совокупности организационно-технологический модуль простого технологического процесса [12]. Анализ организационно-технологического модуля производится на уровне рабочих операций. При этом используется структурно-функциональное моделирование, включающее разработку с помощью формальных методов теории графов [13], экспертного оценивания [14, 15 и др.] и сетевого планирования и управления [13] модели пространственно-технологической структуры модуля и на ее основе функциональной модели организационно-технологического модуля простого технологического процесса, в которой используются методы сетевого планирования и теории расписаний [16 и др.].

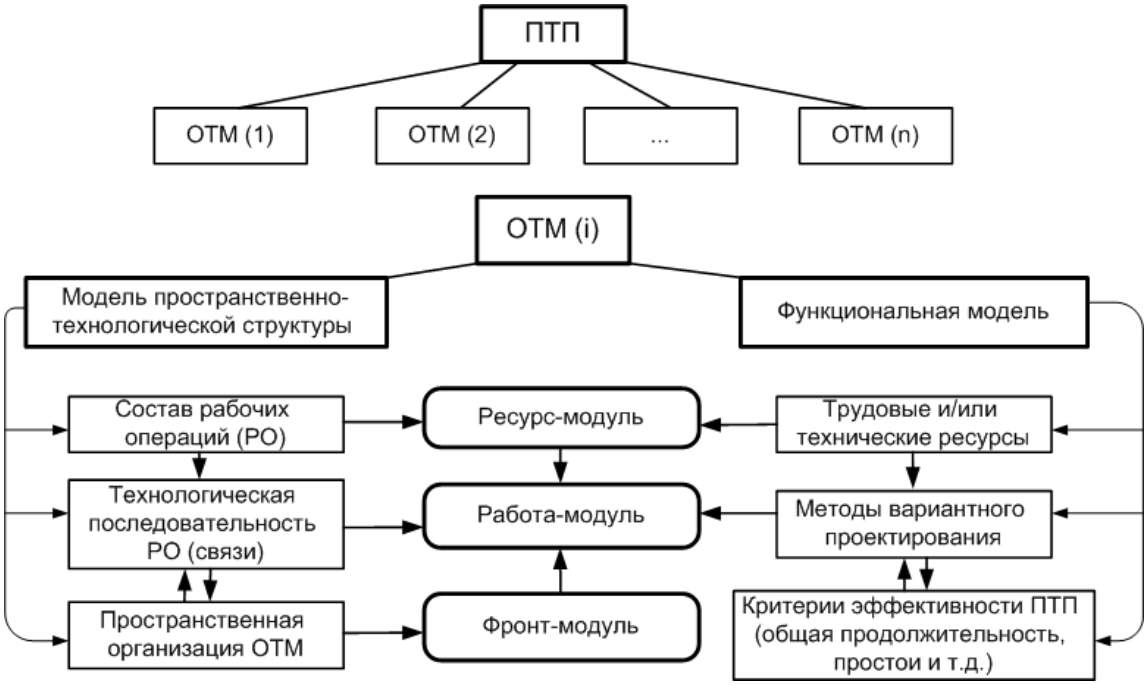


Рисунок 1. Организационно-технологический модуль простого технологического процесса

С помощью структурной модели организационно-технологического модуля определяются технологические взаимосвязи входящих в него рабочих операций и пространственные характеристики фронтов-модулей, а также выделяются группы рабочих операций, которые потенциально могут выполняться параллельно. В этом случае появляется возможность на каждую параллельно выполняемую рабочую операцию назначать своего исполнителя.

Решение задачи оптимального или субоптимального выбора количества исполнителей на выполнение всех рабочих операций организационно-технологического модуля должно производиться на функциональной модели модуля при составлении расписаний их работы. В этой же задаче определяется общая продолжительность выполнения работы-модуля на фронте-модуле. Эта продолжительность является нормой времени (затрат труда), затрачиваемого ресурсом-модулем на выполнение единицы объема работ в рассматриваемом простом технологическом процессе. В исследовании, проведённом на примере устройства сварных соединений сборных железобетонных конструкций, такой единицей измерения объёмов работ является один стык, и норма затрат труда (времени) определяется на этот объём работ.

Таким образом, формализованный подход к формированию организационно-технологических модулей позволяет повысить степень организационной эффективности простых технологических процессов, характеризующихся следующими показателями качества: нормы затрат труда и машинного времени на единицу продукции, время простоев между операциями, количественный, профессиональный и квалификационный состав исполнителей, организация рабочего пространства и т.д.

В существующей инженерной практике технического нормирования [17] повышение организационной эффективности простых технологических процессов достигается в результате применения методов хронометражных наблюдений за работой исполнителей рабочих операций, проводится анализ этой работы, исключаются лишние и заменяются малоэффективные рабочие операции или отдельные рабочие приёмы в операциях. Недостатком такого подхода является то, что исходными данными хронометражных наблюдений служит работа исполнителей, эффективность которой изначально не оценивается и складывается в процессе производства работ. В случае внедрения инновационных разработок описанная методика превращается в недостаточно упорядоченную итерационную процедуру поиска средств для повышения эффективности структуры и работы изучаемых трудовых и технических ресурсов. Кроме того, оказывается затруднительным формализовать описанные методы хронометражных наблюдений для использования их в системах автоматизированной подготовки производства. Применение структурно-функционального моделирования в значительной степени устраняет эти недостатки.

Ниже приведен пример применения формализованных методов формирования организационно-технологического модуля простого технологического процесса устройства сварных соединений сборных железобетонных конструкций. Вначале формируется модель пространственно-технологической структуры организационно-технологического модуля.

Формирование модели пространственно-технологической структуры

Исходными данными для исследования послужили взятые из [18] следующие характеристики устройства сварных соединений (см. табл. 1): список рабочих операций сварки стыков, исполнители, обозначение операций в списке. Кроме того, в таблице приведены переобозначения рабочих операций, отражающие их технологическую последовательность.

Как видно из таблицы 1, в состав изучаемого организационно-технологического модуля входит 24 рабочих операции. С помощью методов сетевого планирования [13 и др.] и экспертных оценок [14, 15 и др.] проведено технологическое и пространственное упорядочение этих операций. В результате сформирована модель пространственно-технологической структуры организационно-технологического модуля, представляющая собой сетевую модель вида «вершины-работы» [6]. Вершинами в ней являются рабочие операции, которые в таблице 1 обозначены соответствующими элементами последовательности (a_i), $i=1,\ldots 24$.

В исследовании отыскиваются технологическая и пространственная упорядоченности раздельно, а затем они объединяются в одном графе. При этом технологическая упорядоченность определяется с применением метода экспертных оценок, а упорядочение пространства производится путём разбиения общего пространства организационно-технологического модуля на подпространства с помощью отношения эквивалентности. Для сопоставления в явном виде исходной и найденной технологической последовательностей рабочих операций в таблице 1 введён столбец последовательности (b_i), $i=1,\ldots..24$, выявленной по результатам исследования.

Таблица 1. Перечень рабочих операций устройства сварных соединений

Наименование рабочей операции	Исполнитель	Обозначение операции в исходном списке	Переобозначение* операции в ее технологической последовательности
Подготовка стыков к сварке	сварщик 4 кат.	a_1	b_6
отрезка чрезмерно длинных стержней	сварщик 4 кат.	a_2	b_7
заготовка вставок	сварщик 4 кат.	a_3	b_8
отгиб стержней для установления их соосности на участках соединения	сварщик 4 кат.	a_4	b_9
разделка концов стержней арматуры	Сварщик 4 кат.	a_5	b_{10}
установка и уплотнение съемных форм	сварщик 4 кат.	a_6	b_{12}
установка и прихватка скоб и накладок	сварщик 4 кат.	a_7	b_{14}
Подготовка оборудования и материалов к сварке	лаборант, электромеханик 3 кат.	a_8	b_4
испытание материалов	лаборант	a_9	b_{13}
проверка тех. исправности сварочного оборудования	электромеханик 3 кат.	a_{10}	b_{11}
заземление корпуса трансформатора	электромеханик 3 кат.	a_{11}	b_5
Сварка стыков арматуры	сварщик 4 кат.	a_{12}	b_{17}
Снятие съемных формующих приспособлений, их охлаждение и очистка от шлака	сварщик 4 кат.	a_{13}	b_{19}
Пооперационный контроль сварочного процесса	мастер	a_{14}	b_{18}
входной контроль материалов	мастер	a_{15}	b_1
проверка соответствия проекту расположения закладных деталей	мастер	a_{16}	b_2
проверка соответствия проекту поступающих электродов и других материалов	мастер	a_{17}	b_3
качество подготовки стыков к сварке	мастер	a_{18}	b_{15}
контроль технического состояния сварочного оборудования	электромеханик 3 кат.	a_{19}	b_{16}
Контроль качества законченных сварных стыков	лаборант, сварщик 4 кат., мастер	a_{20}	b_{20}
визуальный контроль	сварщик 4 кат.	a_{21}	b_{21}
контроль геометрических параметров сварных стыков	мастер	a_{22}	b_{22}
неразрушающие методы контроля	лаборант	a_{23}	b_{23}
вырезание ответственных соединений для механических испытаний	лаборант	a_{24}	b_{24}

Модель пространственно-технологической структуры разрабатывается поэтапно.

1. Создание матрицы технологической последовательности, в которую заносятся результаты экспертного оценивания последования-предшествования операций в парных сравнениях. На этой же матрице учитываются различного рода неопределенности (независимость, невозможность определения отношения «предшествования-последования» между двумя операциями и т.д.).
2. Построение соответствующего матрице графа, исключение составных операций.
3. Разбиение графа технологической последовательности на слои, нахождение и отсеивание путей, являющихся следствием свойства транзитивности.
4. Разбиение слоёв на подклассы пространственной эквивалентности рабочих операций.

5. Создание конечного графа путем объединения графов технологической и пространственной структур.

Задача технологического упорядочения операций в математической постановке формулируется следующим образом.

Построим граф $G=(A, U)$, где $A=\{a_i \mid i=1,..,24\}$, $U = \{(a_i, a_j) \mid a_i<<a_j\}$, где символ “<<” обозначает отношение порядка в технологической последовательности операций, а именно $a_i<<a_j$ тогда и только тогда, когда a_i предшествует a_j. Для построения воспользуемся представлением графа в виде матрицы, с помощью которой вводится отношение порядка.

Требуется найти последовательность (b_i), являющуюся перестановкой последовательности (a_i) такую, что из того, что $b_i<<b_j$ следует, что $i<j$.

Отношение порядка “<<” определяется методом экспертных оценок, а именно методом парного сравнения каждого из элементов последовательности (a_i) со всеми остальными. Результаты сравнения заносятся в матрицу связей между элементами последовательности (a_i) (см. табл. 2).

Таблица 2. Матрица технологических связей между рабочими операциями организационно-технологического модуля

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}	a_{17}	a_{18}	a_{19}	a_{20}	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}
a_1	0	*	*	*	*	*	*	#	#	#	#	1	1	#	0	?	0	1	1	1	1	1	1	1
a_2	*	0	#	#	#	1	1	#	#	#	#	1	1	#	0	0	0	1	#	1	1	1	1	1
a_3	*	#	0	#	#	1	1	#	#	#	#	1	1	#	0	#	0	1	1	1	1	1	1	1
a_4	*	#	#	0	#	1	1	#	#	#	#	1	1	#	0	0	#	1	#	1	1	1	1	1
a_5	*	#	#	#	0	1	1	#	#	#	#	1	1	#	0	0	#	1	1	1	1	1	1	1
a_6	*	0	0	0	0	0	1	#	#	#	#	1	1	#	0	#	#	1	1	1	1	1	1	1
a_7	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	#	0	0	0	#	#	1	1	1	1	1
a_8	*	#	#	#	#	#	1	0	*	*	*	1	1	#	#	#	#	#	1	1	1	1	1	1
a_9	#	#	#	#	#	#	1	*	0	0	0	1	1	1	*	#	0	#	1	1	1	1	1	1
a_{10}	#	#	#	#	#	#	1	*	1	0	0	1	1	#	#	#	0	#	1	1	1	1	1	1
a_{11}	#	#	#	#	#	#	1	*	1	1	0	1	1	#	#	#	#	#	1	1	1	1	1	1
a_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	#	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
a_{13}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	#	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
a_{14}	#	#	#	#	#	#	#	#	0	#	#	#	#	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
a_{15}	1	1	1	1	1	1	1	#	*	#	#	1	1	1	0	*	*	1	#	1	1	1	1	1
a_{16}	?	1	#	1	1	#	1	#	#	#	#	1	1	1	*	0	#	#	#	1	1	1	1	1
a_{17}	1	1	1	#	#	#	1	#	1	1	#	1	1	1	*	#	0	#	1	1	1	1	1	1
a_{18}	0	0	0	0	0	0	#	#	#	#	#	1	1	1	0	#	#	0	#	1	1	1	1	1
a_{19}	0	#	0	#	0	0	#	0	0	0	0	1	1	1	#	#	0	#	0	1	1	1	1	1
a_{20}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	#	#	#	#
a_{21}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	#	0	#	#	#
a_{22}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	#	#	0	#	#
a_{23}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	#	#	#	0	#
a_{24}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	#	#	#	#	0

Обозначим элемент матрицы, находящийся на a_i-й строке и в a_j-м столбце, за a_{ij}.

В табл. 2 введены следующие обозначения элементов a_{ij}:

- 1, если $(a_i, a_j) \in U$, то есть $a_i << a_j$;
- 0, если $(a_j, a_i) \in U$ то есть $a_j << a_i$.

Кроме того, для описания неопределённости при экспертном оценивании введены также:

- #, если (a_i, a_j) не принадлежит U & (a_j, a_i) не принадлежит U;
- *, если в (a_i, a_j) один из элементов является составной частью другого;
- ?, если взаимосвязь между простой и составной операцией двояка и не поддаётся определению.

Разобьём граф *G* на слои, такие что все элементы данного слоя не имеют предков в рассматриваемом и последующих слоях, элементы первого слоя не имеют предков, элементы последнего – потомков;

Для разбиения графа, представленного в виде матрицы (табл. 2), на слои предложен следующий алгоритм.

База алгоритма: найдём все строки a_i в матрице такие, что из того, что $i \neq j$ следует, что $a_{ij} \neq 0$ и поместим такие a_i в первый слой. Очевидно, такие a_i будут существовать, иначе в графе найдутся циклы и, следовательно, этот граф не может однозначно задавать отношение порядка.

Шаг алгоритма: допустим, мы знаем все элементы, находящиеся в слоях от 1 до *k*, найдём тогда элементы, принадлежащие слою *k+1*. Для этого следует найти строки a_i, такие, что из того, что $a_{ij}=0$ & $i \neq j$ следует, что a_j содержится в слоях от 1 до *k*.

Алгоритм заканчивает свою работу при нахождении всех строк a_i, которые не содержат единиц.

В результате применения алгоритма получен граф, разбитый на 7 слоёв (см. рис. 2). Вследствие многочисленности связей между операциями и сложности их визуального восприятия каждый элемент выделен из слоя, и для него составлен список необходимых к выполнению предшествующих операций. Таким образом, в каждом слое выделены те операции, которые технологически независимы и потенциально могут выполняться параллельно.

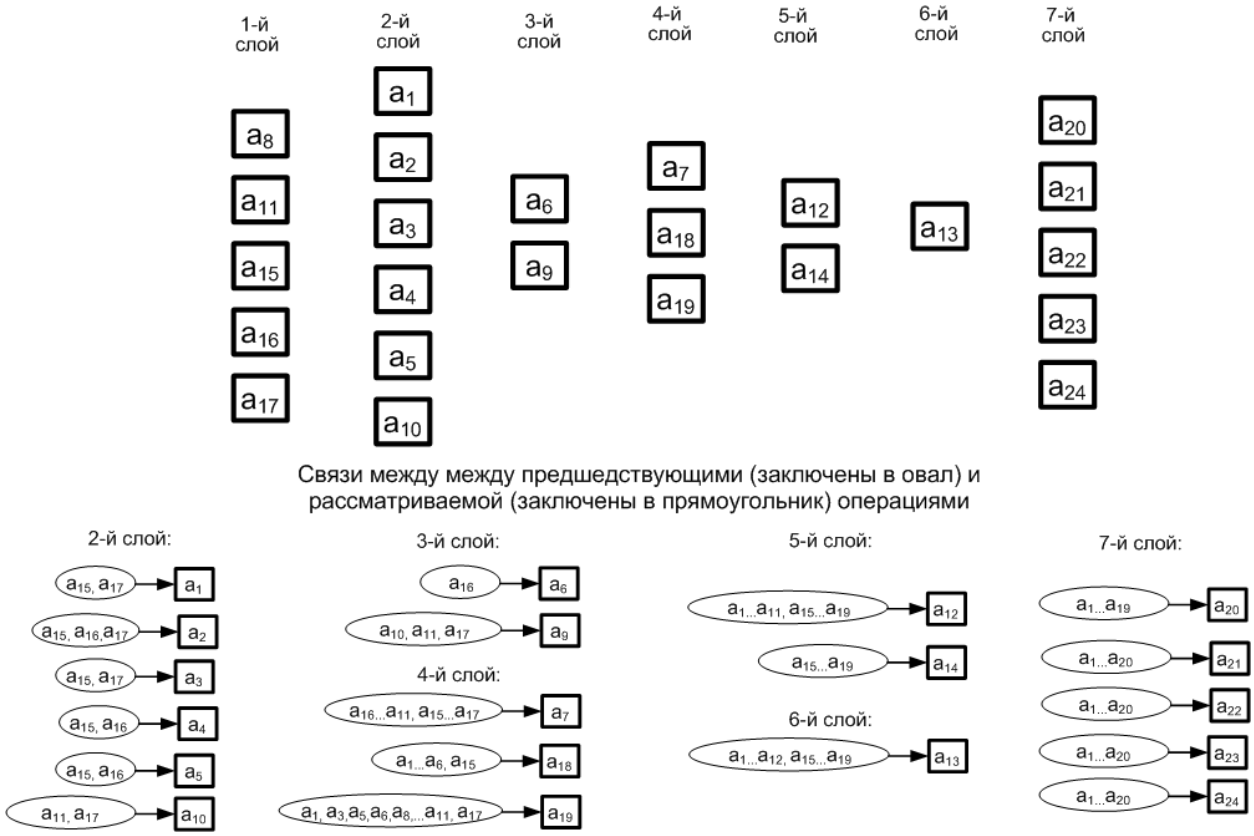


Рисунок 2. Граф технологической структуры организационно-технологического модуля простого технологического процесса устройства сварных соединений элементов сборных железобетонных конструкций. Построен по данным табл. 2. Обозначения: a_1, ... , a_{24} – рабочие операции ОТМ (см. табл. 1); → – технологические связи между операциями (см. табл. 2).

Изучение табл. 2 позволяет выявлять ошибки и неточности в первичных исходных. Так, в рассматриваемом примере (табл. 1) было установлено:

- операция a_{15} является составной, включающей в себя операции a_{16}, a_{17} и a_9 и может присутствовать в любом из первых трех слоев;
- операция a_{14} не является составной и может выполняться параллельно a_{12};
- циклы, появившиеся в результате экспертизы, устранены.

С учётом выявленных ошибок была составлена новая таблица (табл. 3), в которую были внесены соответствующие исправления, а операции перенумерованы с учётом их технологической последовательности. В этой таблице составные операции выделяются жирным шрифтом, входящие в них операции начинаются с прописной буквы, а простые операции, не являющиеся частью каких-либо других, начинаются с заглавной.

Таблица 3. Перечень рабочих операций организационно-технологического модуля, упорядоченный в их технологической последовательности с указанием рабочих мест для выполнения операций

Наименование рабочей операции	Исполнитель	Рабочее пространство операции*	Новое обозначение
Входной контроль	мастер		b_1
проверка соответствия проекту расположения закладных деталей	мастер	РЗС	b_2
проверка соответствия проекту поступающих электродов и других материалов	мастер	УПП	b_3
Подготовка оборудования и материалов к сварке	лаборант, электромехани к 3 кат.		b_4
заземление корпуса трансформатора	электромехани к 3 кат.	ППСО	b_5
Подготовка стыков к сварке	сварщик 4 кат.		b_6
отрезку чрезмерно длинных стержней	сварщик 4 кат.	УПП	b_7
заготовку вставок	сварщик 4 кат.	УПП	b_8
отгиб стержней для установления их соосности на участках соединения	сварщик 4 кат.	РЗС	b_9
разделка концов стержней арматуры	Сварщик 4 кат.	РЗС	b_{10}
проверка тех. исправности сварочного оборудования	электромехани к 3 кат.	ППСО	b_{11}
установка и уплотнение съемных форм	сварщик 4 кат.	РЗС	b_{12}
испытание материалов	лаборант	Лаборатория	b_{13}
установка и прихватка скоб и накладок	сварщик 4 кат.	РЗС	b_{14}
Качество подготовки стыков к сварке	мастер	РЗС	b_{15}
Контроль технического состояния сварочного оборудования	Электромехани к 3 кат.	ППСО	b_{16}
Сварка стыков арматуры	сварщик 4 кат.	РЗС	b_{17}
Пооперационный контроль сварочного процесса	мастер	РЗС	b_{18}
Снятие съемных формующих приспособлений, их охлаждение и очистка от шлака	сварщик 4 кат.	РЗС	b_{19}
Контроль качества законченных сварных стыков	лаборант, сварщик 4 кат., мастер		b_{20}
визуальный контроль	сварщик 4 кат.	РЗС	b_{21}
контроль геометрических параметров сварных стыков	мастер	РЗС	b_{22}
неразрушающие методы контроля	лаборант	РЗС	b_{23}
вырезание ответственных соединений для механических испытаний	лаборант	РЗС+ Лаборатория	b_{24}

Примечание. Введены следующие сокращения:
РЗС – рабочая зона сварки;
ППСО – перемещаемый пост сварочного оборудования;
УПП – участок приёмки и подготовки материалов.

В соответствии с выявленной последовательностью по данным табл. 3 был построен новый граф (рис. 3). В нём, кроме всего прочего, были исключены дуги, существование которых следует из свойства транзитивности, и вследствие этого являются избыточными. В этом графе все связи между элементами в явном виде представлены в виде дуг.

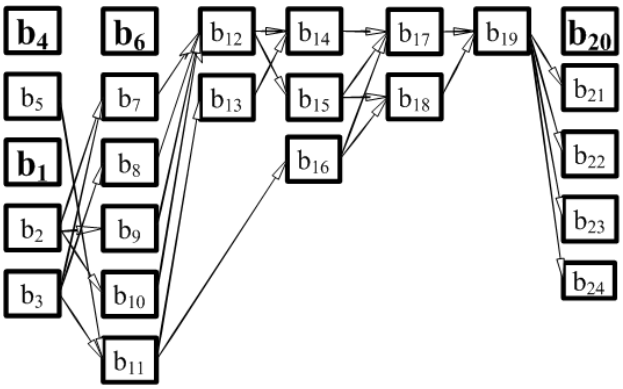


Рисунок 3. Граф технологической структуры организационно-технологического модуля, представленного на рис. 2, после корректировки

После построения графа технологической структуры ОТМ ПТП произведено пространственное упорядочение рабочих операций организационно-технологического модуля. Для этого общее пространство ОТМ разбито на основное и три обслуживающих подпространства (см. табл. 3). Обозначим эти подпространства следующими числами:

- участок приёмки и подготовки материалов (обслуживающее) – 1;
- рабочая зона сварки (основное) – 2;
- перемещаемый пост сварочного оборудования (обслуживающее) – 3;
- лаборатория (обслуживающее) – 4.

Тогда сопоставим каждому b_i соответствующее число k_i – номер основного или обслуживающего подпространства.

Далее было введено отношение пространственной эквивалентности “==” по правилу: из того, что $b_i, b_j \in (b_i)$ & $k_i = k_j$ следует, что $b_i == b_j$, то есть рабочие операции находятся в одном и том же подпространстве. Это отношение отражено на графе пространственной структуры (рис. 4). На этом рисунке выделены слои технологической упорядоченности графа и между рабочими операциями установлены связи пространственной эквивалентности.

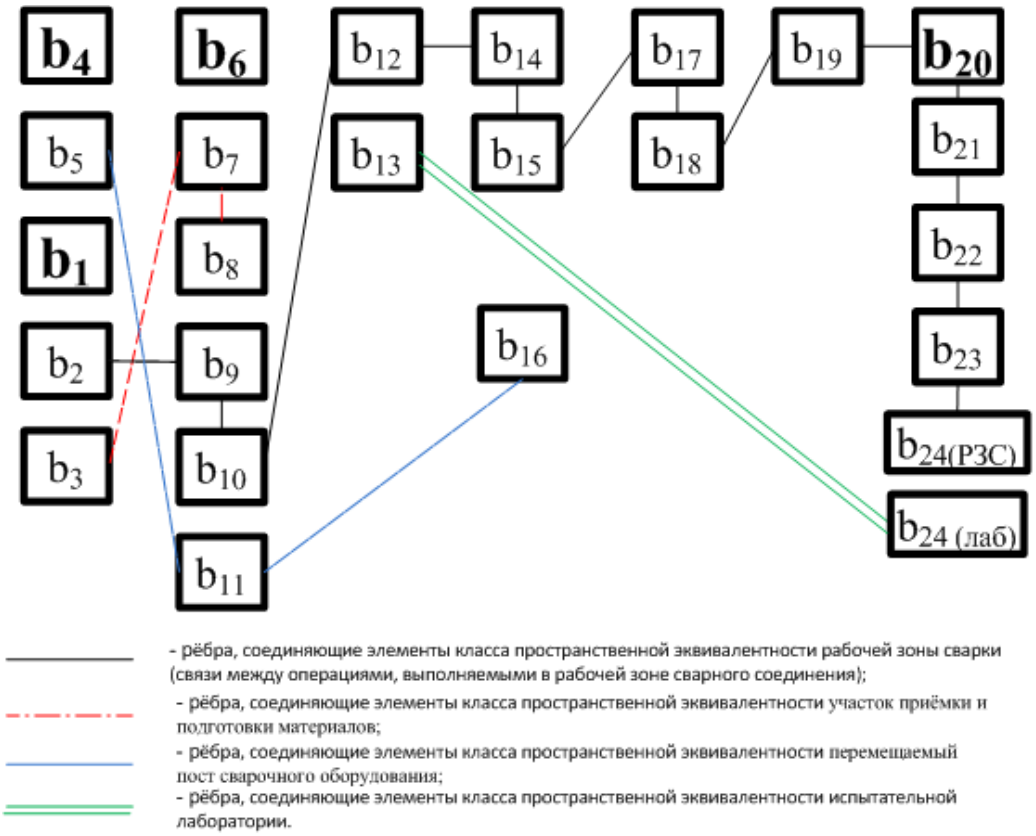


Рисунок 4. Граф пространственной структуры простого технологического процесса устройства сварных соединений элементов сборных железобетонных конструкций

Математическое описание пространственного упорядочения сводится к следующему: рассматривается граф $G = (B, F)$ (рис. 4), $B=\{b_i \mid i=1\ldots24\}$, $F = U K^c$ таких, что $c Є (b_i)$ (c называется индексом класса), $K^c=\{b_i \mid b_i Є (b_i) \ \& \ b_i==c\}$. Так как класс эквивалентности получается по любому элементу этого класса и классы взаимно не пересекаются, то можно заменить индекс класса на подпространство выполнения операций класса.

Пространственное отношение эквивалентности вводится для оценки возможности параллельного выполнения технологически независимых операций. Такая оценка из определения ОТМ представляет интерес только при определении пространства рабочей операции с точностью до фронта-модуля.

В настоящей работе список исполнителей рабочих операций, приведённый в табл. 1, принят заданным, то есть задача определения оптимального или субоптимального распределения операций между исполнителями не рассматривается. Такая задача должна решаться на функциональной модели организационно-технологического модуля. По введённому в табл. 1 списку исполнителей аналогично графу, представленному на рис. 4, строится граф ресурсной эквивалентности рабочих операций (рис. 5). Исполнителям присваиваются соответствующие номера:

- мастер – 1;
- электромеханик 3 кат. – 2;
- сварщик 4 кат. – 3;
- Лаборант – 4.

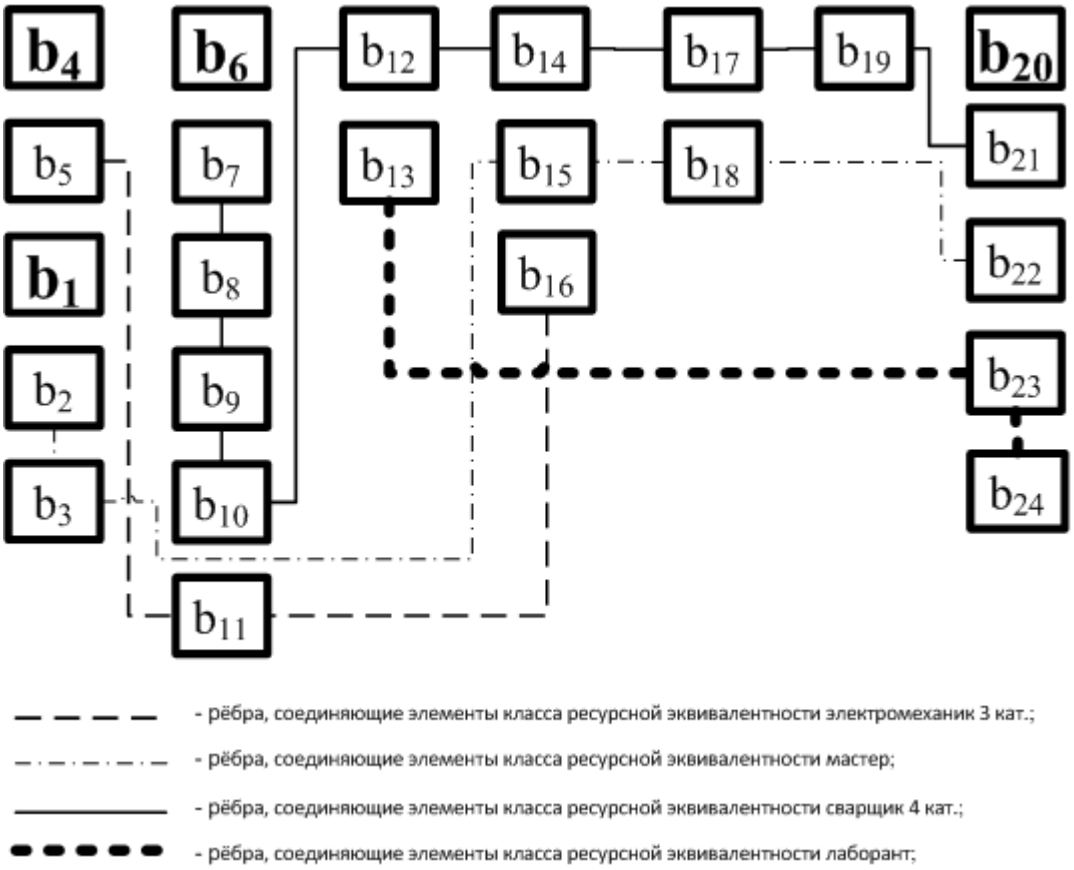


Рисунок 5. Структура распределения трудовых ресурсов простого технологического процесса устройства сварных соединений элементов сборных железобетонных конструкций

Граф ресурсной эквивалентности рабочих операций также составляется для оценки возможности параллельного выполнения операций.

Разработка функциональной модели организационно-технологического модуля

Как показано выше, модель пространственно-технологической структуры формируется путем объединения графов технологической и пространственной упорядоченностей и представляет собой объединенный граф, изображенный на рис. 6. В общем случае на этом объединенном графе отыскивается оптимальное или субоптимальное количество исполнителей соответствующих профессий и квалификаций, распределение операций между ними, а также расписаний их работы из условий минимального общего времени выполнения всех операций, входящих в организационно-технологический модуль. Постановка описанной задачи, выбор методов и ее решение представляет собой функциональную модель организационно-технологического модуля. В настоящем исследовании рассмотрен упрощенный вариант функциональной модели, в которой количество ресурсов и распределение операций между ними принято заданным (рис. 5) и включено в функциональную модель (рис. 6).

В функциональной модели для каждой рабочей операции введено значение времени ее выполнения t_{ijkl} , где i – индекс элемента последовательности (номер операции), $i=1,\ldots,24$; j – номер слоя, в котором находится операция, $j=1, \ldots,7$; k – номер основного или обслуживающего подпространства, $k=1,\ldots,4$; l – номер активного (трудового и/или технического) ресурса, $l=1,\ldots,4$.

Отметим, что везде, где это возможно, t_{ijkl} однозначно может быть заменено значением t_i , т.е. $t_{ijkl}=t_i$.

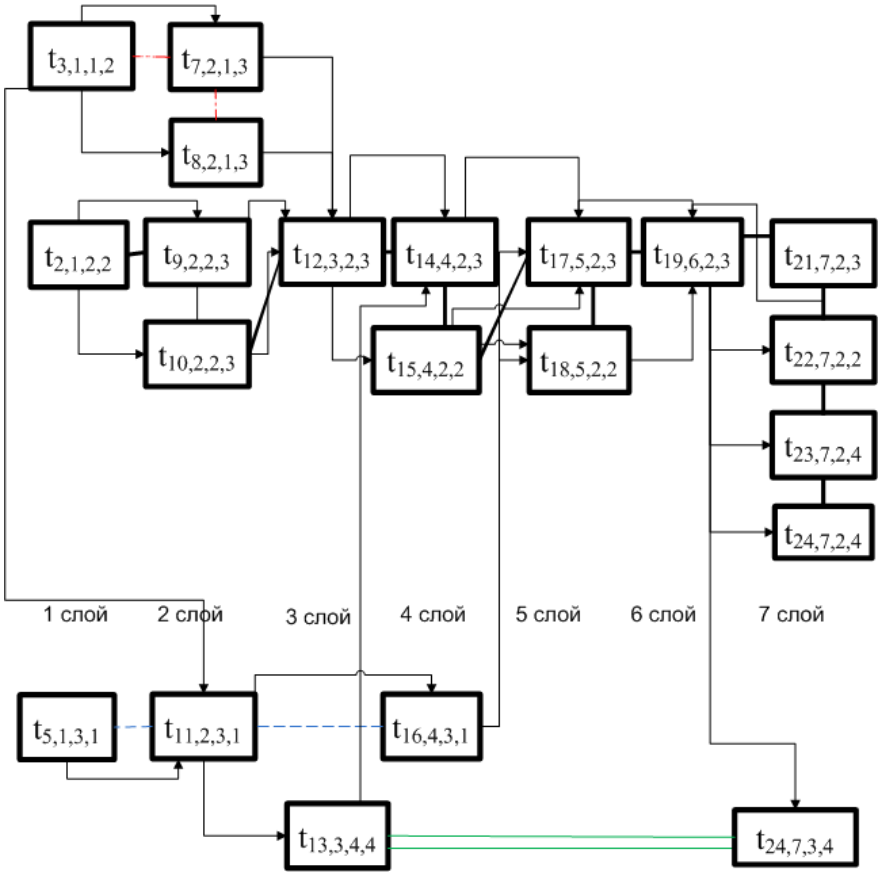


Рисунок 6. Граф организационно-технологического модуля простого технологического процесса

С помощью сформированной структурно-функциональной модели находится общая продолжительность операций основного подпространства (РЗС) организационно-технологического модуля по формуле:

$$T_{OTM} = \sum_{j=1}^{7} f(t_{i_n,j,k,l_n}, f(t_{i_{n-1},j,k,l_{n-1}}, \ldots f(t_{i_2,j,k,l_2}, t_{i_1,j,k,l_1})\ldots)),$$

где n для каждого j – количество элементов в слое;
k=2;

$$f(t_{i_1,j,k,l_1}, t_{i_2,j,k,l_2}) = \begin{cases} t_{i_1,j,k,l_1} + t_{i_2,j,k,l_2}, l_1 = l_2; (последовательная \cdot работа \cdot одного \cdot ресурса) \\ \max(t_{i_1,j,k,l_1}, t_{i_2,j,k,l_2}), l_1 \neq l_2; (параллельная \cdot работа \cdot двух \cdot ресурсов) \end{cases}.$$

Продолжительность работ в основном подпространстве является определяющей для остальных подпространств и для смежных процессов, поэтому рабочие операции в обслуживающих подпространствах могут начинаться с моментов, более ранних, чем в основном подпространстве. Определение начал и окончаний продолжительностей выполнения операций в соответствующих обслуживающих подпространствах определяются по формулам:

$$T_{УПП\ окончания} = t_2+t_9+t_{10}$$

$$T_{УПП\ начало} = T_{УПП\ окончания} - (t_3+t_7+t_8)$$

$$T_{ППСО\ окончания} = t_2+t_9+t_{10}+t_{12}+t_{14}+t_{15}$$

$$T_{ППСО\ начало} = T_{ППСО\ начало} - (t_{16}+t_{11}+max(t_5,t_3))$$

$$T_{Лаборатория\ окончание} = t_2+t_9+t_{10}+t_{12}+t_{15}$$

$T_{Лаборатория\ начало}$ *варьируется от* $(t_2+t_9+t_{10}+t_{12}+t_{15} - t_{13} - max(t_3,t_5)+t_{11})$ *до* $(t_2+t_9+t_{10}+t_{12}+t_{15} - t_{13})$

Продолжительность работы без учёта простоев каждого ресурса-модуля:

$$T_r = \sum T_{ijkl}{:}l=r\, t_{ijkl},$$

где *r* – индекс исполнителя.

Простои каждого исполнителя определяются по формуле:

$$T_{r\ ок.\ факт.} - T_{r\ нач.\ факт.} - T_{r.}.$$

В качестве примера ниже приведена оценка простоев электромеханика:

$$T_{простоев} = T_{ППСО\ начало} - (t_{16}+t_{11}+ max(t_5,t_3)) - T_{ППСО\ начало} - t_{16} - t_{11} - t_5 = max(0,\ t_3 - t_5).$$

Таким образом, с помощью структурно-функциональной модели оказывается возможным определять основные показатели организационной эффективности простого технологического процесса (в данном случае сварки стыков сборных ЖБК).

Выводы

С помощью структурно-функциональных моделей и методов формализованного упорядочения рабочих операций простых технологических процессов строительного производства предлагается следующее.

1. Использовать методику формирования организационно-технологических модулей простого технологического процесса сварки стыков сборных железобетонных конструкций для разработки организационно-технологических модулей любых других технологических процессов. Дополнить методику оптимизационными методами распределения рабочих операций между исполнителями и составления вариантов оптимальных или субоптимальных расписаний их работы.

2. Применять получаемые показатели организационной эффективности простых технологических процессов (нормы затрат труда и машинного времени, состав рабочих операций, количество и равномерность загрузки исполнителей, их простои и т.д.) для анализа и совершенствования работы исполнителей, повышения производительности труда, поиска и внедрения инновационных разработок вплоть до автоматизации и роботизации процессов строительного производства. Рекомендуется проводить сплошной или выборочный мониторинг совершенствуемых процессов и вести учёт индивидуализированных норм времени (или выработки) ресурсов-модулей.

3. Использовать организационно-технологические модули простых технологических процессов для разработки баз данных для календарного планирования строительно-монтажных работ и в дальнейшем для автоматизации календарного планирования и оперативно-производственного управления.

4. Воссоздать систему технического нормирования строительных процессов на современной научной и технологической основе в виде программных продуктов, позволяющих каждой строительной организации разрабатывать свою внутриорганизационную систему норм затрат труда и машинного времени и позволяющую при этом создавать индивидуализированные нормы для каждого трудового и/или технического ресурса (ресурса-модуля). При разработке этих программных продуктов использовать рассмотренные в статье формализованные методы упорядочения организационно-технологических модулей простых технологических процессов – методы теории графов, экспертного оценивания, сетевого планирования и теории расписаний.

Литература

1. Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на долгосрочную перспективу (до 2030 г.). М. , 2008.
2. Приоритетные направления развития науки, технологий и техники и перечень критических технологий Российской Федерации / Утверждены президентом Российской Федерации 21 мая 2006 г. Пр-843.
3. Калюжнюк М. М., Сандан Р. Н. О концептуальных основах инновационного развития строительной отрасли России: системно-синергетический подход // Вестник гражданских инженеров. 2010. №3(24). С. 108-117.
4. Aquilano N., Chase R., Jacobs R. Production and Operations Management / McGraw-Hill College. 1998. 612 p.
5. Калюжнюк М. М., Сандан Р. Н. Структурная классификация элементов строительных процессов // Вестник гражданских инженеров. 2008. №1(14). С. 46-52.
6. Калюжнюк М. М., Сандан Р. Н. Изучение адекватности модели пространственно-технологической структуры процесса возведения объекта конкретным условиям строительства // Вестник гражданских инженеров. 2011. №2(27). С. 105-115.
7. Taylor F. W. The principles of scientific managementю Harper, 1913. 144 p.
8. Развитие теории и совершенствование методологии календарного планирования строительства в суровых условиях Крайнего Севера. Диссертация на соискание уч. степени докт. техн. наук / Климов, Сергей Эдуардович – 05.23.08 – Санкт-Петербург, 2005.
9. Chamulova B. Increasing time scheduling efficiency in the building process // Slovak journal of civil engineering. 2011. Vol. XIX, No. 2. Pp. 16–20.
10. Голуб Л. Г., Ляшенко Е. Н. АСУ строительного треста. М. : Стройиздат, 1976. 177 с.
11. Воропаев В. И. и др. Методические указания по декомпозиции объектов строительства на проектно-технологические модули. М. : ВНИИГиМ, 1988. 92 с.
12. Калюжнюк А. В. Определение показателей организационной эффективности простых технологических процессов на их структурно-функциональных моделях // Научно-исследовательская работа студентов СПбГАСУ: Сб. научных трудов студентов победителей конкурса грантов 2010-2011 г. Вып. 6/ СПб. гос. архит.-строит. ун-т. СПб. , 2011. С. 32-38.
13. Kaufmann A., Desbazeille G. La Methode du chemin critique, Ed. Dunod, Paris, 1966. 188 p.
14. Литвак Б. Г. «Экспертная информация» методы получения и анализа. М. : Радио и связь, 1982. 184 с.
15. Балдин К. В., Быстров О. Ф., Соколов М. М. Эконометрика. М. : Юнити-Дана, 2004. 254 с.
16. Танаев В. С., Сотсков Ю. Н., Струсевич В. А. Теория расписаний. Многостадийные системы. М. : Наука. Главная редакция физ.-мат. литературы, 1989. 328 с.
17. Балова Е. Ф., Бакерман Р. С. и др. Нормирование труда рабочих в строительстве / Под ред. Е.Ф. Баловой. М. : Стройиздат, 1985. 440 с.
18. Чахкиев И. М. Формирование нормативного уровня качества сварных соединений сборных железобетонных конструкций // Научно-исследовательская работа студентов СПбГАСУ: Сб. научных трудов студентов победителей конкурса грантов 2010-2011 г. Вып. 6/ СПб. гос. архит.-строит. ун-т. СПб. , 2011. С. 26-32.

**Михаил Модестович Калюжнюк, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7(812)316-22-79, эл. почта: gamma5105@mail.ru

Заведующий кафедрой,
д.т.н., профессор
Ватин Николай Иванович

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Инженерно-строительный факультет

Кафедра «Технология, организация и экономика строительства» (ТОЭС)

Международные магистерские программы по направлению «Строительство»

Что такое магистратура?

- получение квалификации, признанной во всем мире;
- фундаментальное профессиональное образование;
- ускоренный путь к получению степени кандидата технических наук;
- получение знаний и умений, востребованных работодателями на производстве и в науке;
- реальное участие в научно-исследовательской и педагогической деятельности.

Обучение в магистратуре проходит в течение 2 лет, на бюджетной или контрактной основе, по очной или заочной форме. Иногородним предоставляется общежитие.

Выберите одну из наших магистерских программ:

1. Автоматизированное проектирование зданий и сооружений
2. Инженерные системы зданий и сооружений
3. Организация и управление инвестиционно-строительными проектами
4. Теория и практика организационно-технологических решений
5. Энергосбережение и энергоэффективность (при финансовой поддержке ЕС)
6. Международные инвестиционно-строительные проекты (при финансовой поддержке ЕС)

Обучение в ведущих европейских вузах

Каждому магистру предоставляется возможность бесплатной стажировки (от 1 семестра до года) в одном из европейских строительных вузов-партнеров ГОУ СПбГПУ.

Особенности обучения на кафедре:

- индивидуальная работа с каждым магистром, включающая активную научно-исследовательскую работу и опыт педагогической деятельности;
- регулярные выступления на семинарах, конференциях, научных форумах;
- активное взаимодействие преподавателей и студентов в ходе совместной проектной и научно-исследовательской деятельности;
- оперативное обновление учебных дисциплин;
- учебный процесс, построенный на современных компьютерных технологиях в строительстве;
- постоянное общение с представителями ведущих строительных и проектных организаций.

Заочная магистратура как второе высшее образование

Программа ориентирована, прежде всего, на обучение практикующих специалистов, в том числе с техническим «нестроительным» образованием:

- возможность обучения без отрыва от работы;
- использование новейших технологий дистанционного обучения;
- самостоятельный выбор приоритетных направлений обучения.

Контакты

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Гидрокорпус-2, ауд. 204, 301, 201
297-59-49, 535-79-92, 552-94-60, www.stroikafedra.spb.ru