УДК 624.07

© А. Г. Черных, д-р техн. наук, профессор

© Д. В. Нижегородцев, аспирант

© А. Е. Кубасевич, аспирант

© В. В. Цыгановкин, магистрант

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: mdvd0d@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-3-72-78

© A. G. Chernykh, Dr. Sci. Tech, Professor

© D. V. Nizhegorodtsev, post-graduate student

© A. E. Kubasevich, post-graduate student

© V. V. Tsyganovkin, undergraduate

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
Saint Petersburg, Russia)

E-mail: mdvd0d@yandex.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

DESIGN AND CALCULATION OF BUILDING STRUCTURES USING BIM TECHNOLOGIES

Рассматривается проблема отсутствия комплексных критериев оценки конструкторской документации и информационной модели объектов строительства. Изложены основные принципы формирования таких критериев. Приведены совокупные критерии по оценке конструкторских BIM-моделей, разработанные авторским коллективом. Представлены протоколы оценки комиссии независимых экспертов, утвержденные при апробации разработанных критериев на реальных конструкторских моделях. Проведен анализ объективности критериев по коэффициенту конкордации. Выделены основные преимущества и недостатки сформулированных критериев оценки конструкторской BIM-модели.

Ключевые слова: строительные конструкции, технология информационного моделирования, проектирование, системы автоматизированного проектирования, компьютерное моделирование, коллизия, метод конечных элементов.

The paper considers the problem of the lack of comprehensive criteria for evaluating design documentation and information models of construction projects. The main basic principles for forming such criteria are discussed. Aggregate criteria for evaluating design BIM models developed by the author's team are presented. The article presents the evaluation protocols of the Commission of independent experts approved when testing the developed criteria on real design models. There has been carried out an analysis of the objectivity of the criteria by the concordance coefficient. The main advantages and disadvantages of the formulated criteria for evaluating the design BIM model are highlighted.

Keywords: building constructions, building information modeling technology, design, computer-aided design systems, computer modeling, clash, finite element method.

Строительная отрасль как одна из основополагающих в развитии человеческого общества ежегодно наращивает объемы производства, т. е. возведения зданий и сооружений, в том числе в Российской Федерации [1–3]. Для того чтобы процесс строительства считался успешным с точки зрения всех его участников, необходим ответственный подход на всех этапах: в проектировании, строительстве, эксплуатации.

Традиционный подход к проектированию строительных конструкций — разработка всех

необходимых разделов чертежей по отдельности — может вызвать ошибки, обусловленные следующими обстоятельствами:

- разработка разделов конструкторской документации производится изолированно от специалистов-смежников (архитекторов и проектировщиков инженерных систем);
- современные здания и сооружения требуют подготовки большого объема проектной и рабочей документации;

- изменения проектных решений в процессе строительства часто не фиксируются в исполнительной документации, что в итоге приводит к несоответствию готового объекта проектной документации.

Применение технологии информационного моделирования создает возможности для построения совместной междисциплинарной работы проектировщиков, автоматизации процесса разработки проектной документации и согласования изменений в проектные решения. Преимущества и перспективы применения технологии информационного моделирования при проектировании, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений анализируются в работах различных авторов [4–8].

Внедрение технологии информационного моделирования в деятельность строительных организаций РФ требуется согласно поручению Президента Российской Федерации В. В. Путина от 19 июля 2018 г. № Пр-1235 о переходе к системе управления жизненным циклом объектов капитального строительства путем внедрения технологий информационного моделирования. Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве разработал Концепцию внедрения системы управления жизненным циклом объектов капитального строительства с использованием технологий информационного моделирования в Российской Федерации, рассчитанную на период 2019–2024 гг.

При разработке конструкторской документации необходим комплексный подход к производству, экспертизе ПД, РД и самой информационной модели зданий и сооружений. Имеющиеся в нормативах критерии оценки полностью или частично не могут быть использованы при комплексной оценке проекта. Организации, осуществляющие государственную экспертизу проектных решений, разрабатывают региональные требования к приему проектно-сметной документации в формате информационных моделей зданий. Московская государственная экспертиза принимает BIM-модели с 2016 года¹, в Санкт-

Петербурге это происходит с 2019 года². Поэтому исследования по разработке общих универсальных критериев для оценки информационных моделей зданий — актуальная задача.

Комплексные критерии оценки конструкторской документации и информационной модели объектов строительства должны базироваться на следующих принципах:

- 1) соответствие критериев классическим подходам к проектированию. Конструкторские решения должны обеспечивать надежность строительных конструкций и оснований и нормальную эксплуатацию объекта;

- 2) возможность применения критериев к моделям, разработанным в различных программных комплексах, с соблюдением принципов OPEN-BIM. Для изготовления чертежей строительных конструкций используются программы: AutoCAD, Revit, Renga, Tekla, nanoCAD, «Компас-3D» и др. Для проведения расчетов используются следующие программные комплексы, реализующие российские нормы: ЛИРА-САПР, SCAD, Stark ES и др. [9–11];

- 3) обеспечение отсутствия коллизий (геометрических пересечений элементов информационной модели);

- 4) объективность и доступность критериев. Не допускаются различные толкования, проектировщики и эксперты должны одинаково понимать требования к конструкторской документации;

- 5) обязательная верификация и, в случае необходимости, обновление предложенных критериев в процессе создания новых информационных моделей.

В ходе исследований авторов разработаны совокупные критерии по оценке конструкторских BIM-моделей. Оценке подлежит сама 3D-модель, соответствующая ей пространственная расчетная схема, чертежи и пояснительная записка.

Критерии основаны на методе балльных оценок. Информационная модель получает максимальное число баллов по критерию, если в ней отсутствуют замечания, связанные с этим критерием. Чтобы избежать различных ошибок,

¹ Требования к информационным моделям объектов капитального строительства. Ч. 3. Требования к цифровым моделям конструктивных решений зданий для прохождения экспертизы при использовании технологии информационного моделирования // ГИУ г. Москвы «Мосгосэкспертиза». М., 2019.

² Требования к цифровым информационным моделям объектов капитального строительства и недвижимости, представляемых в СИ6/АУ «ЦИЭ». URL: https://www.spbexp.ru/upload/iblock/222/trebovaniya_k_tsim_osnovnye_polozeniya.pdf (дата обращения: 11.04.2020).

присущих данному методу (ошибка контраста, ошибка центрации и т. д.), и добиться простоты восприятия, для каждого численного значения критерия представлено конкретное пояснение. Выдержка из критериев оценки раздела проекта «Конструктивные решения» (КР) приведена в табл. 1.

Проверке на коллизии подвергается не только конструкторская модель, но и общая координационная модель, где проверяются пересечения с архитектурной моделью и моделями инженерных систем. Не допускаются коллизии в виде наложения элементов и пересечения элементов для исключения дублирования пунктов в спецификациях и неправильного подсчета объемов. При проверке коллизий между разделами применяются допуски (до 5–10 мм).

Экспертиза моделей осуществляется независимо представителями разных сфер, не связан-

ных друг с другом, за счет чего обеспечивается объективность выполненной оценки.

Учитывается работа специалистов в различных САПР. Схема взаимодействия программных комплексов приведена на рис. 1.

На рис. 2 представлен фрагмент конструкторской модели, представленной для апробации разработанных критериев. Информационная модель содержит в себе сведения о геометрии, материалах, приложенных нагрузках.

Апробация критериев осуществлялась при оценке более чем 20 конструкторских информационных моделей, созданных на BIM-чемпионатах СПбГАСУ в совместной работе с архитекторами и проектировщиками инженерных систем. По отзывам участников и экспертов, за трехлетний опыт проведения BIM-чемпионатов в критерии в несколько итераций вносились изменения.

Таблица 1

**Критерии оценки информационной модели с уровнями ранжирования:
раздел «Конструктивные решения»**

№ п/п	Критерий оценки	Баллы
1	Соответствие конструкторской модели архитектурной модели	Макс. балл 5
1.1	Полное соответствие	5
1.2	Незначительные несоответствия архитектурной модели	4
1.3	Сильные отклонения от архитектурного проекта, не влияющие на общий образ здания и/или планировки	2
1.4	Грубые нарушения, несоответствие архитектурной модели	0
2	Координация с моделями ОВ, ВВ, ЭС	Макс. балл 5
2.1	Коллизии и пересечения между моделями отсутствуют, отверстия под коммуникации предусмотрены в полном объеме	5
2.2	Отсутствие отверстий в конструкциях, не влияющих на несущую способность конструкции	4
2.3	В модели отсутствуют отверстия, влияющие на несущую способность конструкции	2
2.4	Отверстия под коммуникации не выполнены	0
3	Расчетная часть	
3.1	Сбор нагрузок	Макс. балл 8
3.1.1	Правильный и полный сбор нагрузок	8
3.1.2	Незначительные ошибки при сборе нагрузок	6
3.1.3	Неучет критически важной нагрузки	3
3.1.4	Сбор нагрузок не соответствует модели и назначению здания	0
3.2	Соответствие несущих элементов элементам расчетной схемы	Макс. балл 8
3.2.1	Соответствие расчетной схемы в расчетной программе модели КР	8
3.2.2	Отсутствие части элементов в расчетной модели, в расчетную схему не введены шарниры и т. п.	6
3.2.3	Неверно заданы граничные условия, неверные сечения элементов	3

3.2.4	Полное несоответствие расчетной схемы модели КР	0
3.3	Разработка расчетной схемы	Макс. балл 4
3.3.1	Расчетная схема разработана верно	4
3.3.2	Незначительные ошибки при задании нагрузок	3
3.3.3	Некорректно заданы нагрузки, влияющие на общую несущую способность конструкции	1
3.3.4	Приложенные нагрузки не соответствуют сбору нагрузок и назначению здания	0
3.4	Определение сечений несущей арматуры/профилей	Макс. балл 5
3.4.1	Соответствие заданных материалов в расчетной схеме и модели, корректный расчет армирования/подбора профилей	5
3.4.2	Несоответствия параметров материалов в расчетной схеме и модели КР	4
3.4.3	Неверный расчет конструирования при верном задании материалов	2
3.4.4	Отсутствие этапа конструирования	0
3.5	Расчет фундаментов	Макс. балл 10
3.5.1	Расчет фундаментов выполнен полностью с учетом нагрузок от надземной части	10
3.5.2	Подобраны фундаменты, определены осадки конструкций пристроенного здания, не проведен анализ осадок существующих зданий	8
3.5.3	Подобраны конструкции фундаментов с учетом несущей способности грунта основания, не определены осадки от пристроенного здания, не проведен анализ с учетом существующих зданий	5
3.5.4	Расчет фундаментов не выполнен	0
3.6	Оформление расчетно-пояснительной записки (РПЗ)	Макс. балл 5
3.6.1	РПЗ оформлена качественно и достаточно полно	5
3.6.2	В записке нет данных о результатах расчета	3
3.6.3	РПЗ не оформлена	0
4	Конструирование	
4.1	Проработка армирования горизонтальных конструкций	Макс. балл 10
4.1.1	Конструкции заармированы и законструированы целиком и полностью	10
4.1.2	Отсутствуют незначительные детали, не оформлена спецификация по ГОСТ	8
4.1.3	Элементы конструкции не замаркированы (для спецификации)	5
4.1.4	Армирование не выполнено	0
4.2	Проработка конструкций вертикальных несущих конструкций	Макс. балл 10
4.2.1	Вертикальная несущая конструкция (стена с проемом, колонна) законструирована полностью	10
4.2.2	Отсутствуют незначительные детали и/или болты и т. п., не оформлена спецификация	8
4.2.3	Элементы конструкции не замаркированы (для спецификации)	5
4.2.4	Вертикальные конструкции не проработаны	0
4.3	Проработка ключевых узлов	Макс. балл 10
4.3.1	Выполнен расчет и проработка ключевых узлов	10
4.3.2	Узлы проработаны не полностью	8
4.3.3	Выполнен расчет ключевых узлов (например: расчет на продавливание, расчет длины катета сварного шва, болтов и т. п.)	5
4.3.4	Проработка узлов не выполнена	0
4.4	Оформление чертежей на листах	Макс. балл 20
4.4.1	Чертежи оформлены полностью и качественно	20
4.4.2	Проработаны чертежи с узлами, незначительные ошибки и недостатки	18
4.4.3	Имеются чертежи элементов по п. 4.1 и 4.2 без полной спецификации и ведомости деталей	15
4.4.4	Отсутствуют спецификации и чертежи элементов п. 4.1 и 4.2	10
4.4.5	Элементы конструкций замаркированы, имеется укрупненная спецификация всех элементов	8
4.4.6	Имеются только планы несущих конструкций и типовые разрезы на листах	5
4.4.7	Чертежи отсутствуют полностью	0

Рис. 1. Пример взаимодействия программного комплекса Revit и расчетной программы ЛИРА-САПР

Рис. 2. Фрагмент конструкторской модели с отображением расчетных нагрузок

Оценка моделей по данным критериям производилась независимо друг от друга комиссией экспертов, составленной из преподавателей СПбГАСУ, практикующих инженеров-конструкторов и представителей экспертных организаций Санкт-Петербурга. По результатам оценки конструкторской модели оформлялись протоколы (табл. 2), заверяемые подписью всех членов экспертной комиссии.

В табл. 2 приведены оценки экспертов для представленной информационной модели (рис. 2) раздела «Конструктивные решения» по приведенным выше критериям. Список критериев составлен в соответствии с табл. 1, без повторного приведения пояснений.

Анализ объективности критериев проведен по коэффициенту конкордации, который высчитывается по формуле

Таблица 2

Протокол оценки экспериментальной информационной модели

Оценщик	Номер критерия												
	1	2	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	4.1	4.2	4.3	4.4	
Эксперт 1	5	4	4	6	1	1	1	3	12	6	3	15	
Эксперт 2	5	4	4	6	1	1	1	3	3	6	3	15	
Эксперт 3	4	3	5	5	1	1	1	3	3	6	2	12	
Сумма	14	11	13	17	3	3	3	9	18	18	8	42	$\Sigma = 159$
Квадрат суммы	196	121	169	289	9	9	9	81	324	324	64	1764	$\Sigma = 3359$

$$W = 12S/(m^2(n^3 - n)),$$

где m — число экспертов; n — число факторов; S — сумма квадратов разностей рангов (отклонений от среднего).

Значимость коэффициента конкордации, т. е. степень согласованности, можно определить по шкале Чеддока.

Сумма отклонений от среднего

$$S = 3359 - 159^2/12 = 1252.$$

Тогда коэффициент конкордации

$$W = 12 \cdot 1252/(3^2 \cdot (12^3 - 12)) = 0,97,$$

что свидетельствует о высокой степени согласованности экспертных оценок.

В процессе исследования и апробации подтверждены работоспособность, объективность и достоверность предложенной системы критериев оценки информационных моделей конструкторского раздела.

Разработанная методика может применяться проектировщиками при разработке конструкторского раздела, а также для оценки информационных моделей при проведении экспертизы проектной документации.

Библиографический список

- Идрисова З. Н., Рахматуллина Р. Р. Анализ динамики строительного рынка России // Стратегия, конкурентоспособность, цифровая экономика, здоровьесбережение: сб. науч. тр., посв. 85-летию Уфимского гос. авиационного техн. ун-та. Уфа, 2017. С. 134–137.
- Арифов Э. Сравнительный анализ развития отечественного и мирового рынка строительных услуг // Актуальные проблемы развития экономики и управления в современных условиях: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. Алматы, 2019. С. 25–32.
- Русских В. А., Пирогова О. Е. Влияние информационных технологий на развитие сферы недвижимости // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. 2019. № 1 (35). С. 248–254.
- Абакумов Р. Г., Наумов А. Е., Зобова А. Г. Препимущества, инструменты и эффективность внедрения технологий информационного моделирования в строительстве // Вестник Белгородского гос. технол. ун-та им. В. Г. Шухова. 2017. № 5. С. 171–181. DOI: 10.12737/article_590878fb8be5f0.72456616.
- Селютин Л. Г. Управление жизненным циклом объекта капитального строительства на основе современной технологии информационного моделирования (BIM) // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы Всерос. науч.-практ. конф. СПб.: СПбГАСУ, 2018. С. 3–8.
- Гримитлин А. М., Денисихина Д. М. Энергетическое моделирование — инструмент повышения энергоэффективности зданий // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы Всерос. науч.-практ. конф. СПб.: СПбГАСУ, 2018. С. 93–97.
- Гинзбург А. В. Информационная модель жизненного цикла строительного объекта // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 9. С. 61–65.
- Лушников А. С. Проблемы и преимущества внедрения BIM-технологий в строительных компаниях // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 6 (53). С. 252–256.
- Бохоева Л. А., Зайцев В. А. Алгоритм проектирования складчатых конструкций для многослойных панелей с криволинейной поверхностью // Механики XXI века. 2016. № 15. С. 308–311.
- Лещенко Е. Параметрическое проектирование и высокотехнологичное информационное моделирование строительных конструкций на основе программного решения Tekla и Grasshopper // САПР и графика. 2017. № 8 (250). С. 31–33.
- Каган П. Б., Гудков П. К. Информационное моделирование зданий и традиционное проектирование с применением САПР // Вестник Белгородского гос. технол. ун-та им. В. Г. Шухова, 2017. № 9. С. 164–168.
- Шарманов В. В., Мамаев А. Е., Болейко А. С., Золотова Ю. С. Трудности поэтапного внедрения BIM //

Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 10 (37). С. 108–120.

13. Семенов А. А. Интеграция концепции BIM в учебный процесс строительных вузов // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы Всерос. науч.-практ. конф. СПб., 29–30 марта 2018 года. С. 207–211.

References

1. Idrisova Z. N., Rakhmatullina R. R. *Analiz dinamiki stroitel'nogo rynka Rossii* [Analysis of the dynamics of the construction market in Russia]. *Trudy posvyashchennye 85-letiyu Ufmskogo gos. aviatsionnogo tekhn. un-ta «Strategiya, konkurentosposobnost', tsifrovaya ekonomika, zdorov'esberezhenie»* [Coll. works dedicated to the 85-th anniversary of the Ufa State University "Strategy, competitiveness, digital economy, health protection"]. Ufa, 2017, pp. 134–137.
2. Arifov E. *Sravnitel'nyy analiz razvitiya otechestvennogo i mirovogo rynka stroitel'nykh uslug* [Comparative analysis of the development of the domestic and world market of construction services]. *Trudy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Aktual'nye problemy razvitiya ekonomiki i upravleniya v sovremennykh usloviyakh»* [Proc. of the II international scientific-pract. conf. "Actual problems of development of economy and management in modern conditions"]. Almaty, 2019, pp. 25–32.
3. Russkikh V. A., Pirogova O. E. *Vliyanie informatsionnykh tekhnologiy na razvitie sfery nedvizhimosti* [Influence of information technologies on the development of real estate sector]. *Innovatsionnaya ekonomika: perspektivy razvitiya i sovershenstvovaniya – Innovative economy: prospects for development and improvement*, 2019, no. 1 (35), pp. 248–254.
4. Abakumov R. G., Naumov A. E., Zobova A. G. *Preimushchestva, instrumenty i effektivnost' vnedreniya tekhnologiy informatsionnogo modelirovaniya v stroitel'stve* [Advantages, tools and efficiency of implementation of information modeling technologies in construction]. *Vestnik Belgorodskogo gos. tekhnol. un-ta im. V. G. Shukhova – Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*, 2017, no. 5, pp. 171–181. DOI: 10.12737/article_590878fb8be5f0.72456616.
5. Selyutina L. G. *Upravlenie zhiznennym tsiklom ob'ekta kapital'nogo stroitel'stva na osnove sovremennoy tekhnologii informatsionnogo modelirovaniya (BIM)* [Managing the life cycle of a capital construction object based on modern information modeling technology (BIM)]. *Trudy Vseros. nauch.-prakt. konf. «BIM-modelirovanie v zadachakh stroitel'stva i arkhitektury»* [Proc. of the All-Russia scientific-practical conf. "BIM-modeling in the problems of construction and architecture"]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2018, pp. 3–8.
6. Grititlin A. M., Denisikhina D. M. *Energeticheskoe modelirovanie — instrument povysheniya energoeffektivnosti zdaniy* [Energy modeling as a tool for improving the energy efficiency of buildings]. *Trudy Vseros. nauch.-prakt. konf. «BIM-modelirovanie v zadachakh stroitel'stva i arkhitektury»* [Proc. of the All-Russia scientific-practical conf. "BIM-modeling in the problems of construction and architecture"]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2018, pp. 93–97.
7. Ginzburg A. V. *Informatsionnaya model' zhiznennogo tsikla stroitel'nogo ob'ekta* [Information model of the life cycle of a construction object]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil construction*, 2016, no. 9, pp. 61–65.
8. Lushnikov A. S. *Problemy i preimushchestva vnedreniya BIM-tekhnologiy v stroitel'nykh kompaniyakh* [Problems and benefits of implementing the BIM technologies in construction companies]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2015, no. 6 (53), pp. 252–256.
9. Bokhoeva L. A., Zaytsev V. A. *Algoritmy proektirovaniya skladchatykh konstruksiy dlya mnogosloynnykh paneley s krivolineynoy poverkhnost'yu* [Algorithm for the design of folded structures for sandwich panels with a curved surface]. *Mekhanika XXI veka – Mechanics of the XXI century*, 2016, no. 15, pp. 308–311.
10. Leshchenko E. *Parametricheskoe proektirovanie i vysokotekhnologichnoe informatsionnoe modelirovanie stroitel'nykh konstruksiy na osnove programmnoy resheniya Tekla i Grasshopper* [Parametric design and high-tech information modeling of building structures based on Tekla and Grasshopper software solutions]. *SAPR i grafika – CAD and graphics*, 2017, no. 8 (250), pp. 31–33.
11. Kagan P. B., Gudkov P. K. *Informatsionnoe modelirovanie zdaniy i traditsionnoe proektirovanie s primeneniem SAPR* [Information modeling of buildings and traditional design using CAD]. *Vestnik Belgorodskogo gos. tekhnol. un-ta im. V. G. Shukhova – Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*, 2017, no. 9, pp. 164–168.
12. Sharmanov V. V., Mamaev A. E., Boleyko A. S., Zolotova Yu. S. *Trudnosti poetapnogo vnedreniya BIM* [Difficulties of phased implementation of BIM]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy – Construction of unique buildings and structures*, 2015, no. 10 (37), pp. 108–120.
13. Semenov A. A. *Integratsiya kontseptsii BIM v uchebnyy protsess stroitel'nykh vuzov* [Integration of the concept of BIM in the educational process of construction universities]. *Trudy Vseros. nauch.-prakt. konf. «BIM-modelirovanie v zadachakh stroitel'stva i arkhitektury» 29–30 marta 2018 goda* [Proc. of the All-Russia scientific-practical conf. "BIM-modeling in the problems of construction and architecture" March 29–30, 2018]. Pp. 207–211.