

УДК 004.92; 004.94; 614.849

Использование программных комплексов при изучении дисциплины «Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре»

Голдобина Л.А., д-р. техн. наук, профессор

ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России

Аннотация. Статья поднимает вопрос о необходимости повышения качества подготовки специалистов в области пожарной и техносферной безопасности, способных владеть современными программными комплексами, позволяющими на этапах проектирования строительного объекта, экспертизы проекта и в дальнейшем его эксплуатации принимать или оценивать принятые решения в части обеспечения пожарной безопасности здания и огнестойкости строительных конструкций.

В статье приведены примеры решения задач по оценке огнестойкости несущих железобетонных конструкций с использованием расчетных пакетов Autodesk Robot Professional и Ansys.

Ключевые слова: BIM-технологии, системы автоматизированного проектирования (САПР), программно-вычислительные комплексы, предел огнестойкости строительных конструкций, пожарная безопасность.

The use of software systems in the study of disciplines "Buildings, structures and their resistance to fire"

Goldobina L.A., Holder of an Advanced Doctorate (Doctor of Science) in Engineering Sciences, Full Professor

FSBEE HE Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia

Abstract. The article raises the question of the need to improve the quality of training of specialists in the field of fire and technosphere safety, who are able to own modern software systems that allow at the stages of design of a construction object, examination of the project and further its operation, to make or evaluate the decisions made in terms of providing fire safety, building safety and fire resistance of building structures.

The article provides examples of solving problems for determining the fire resistance of load-bearing reinforced concrete structures using the calculation packages Autodesk Robot Professional and Ansys.

Key words: BIM-technologies, computer-aided design (CAD) systems, software and computing systems, fire resistance of building structures, fire safety.

Для решения задач в области развития единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, пожарной и промышленной безопасности, безопасности в чрезвычайных ситуациях, среди многих стоит вопрос качественной профессиональной подготовки специалистов, способных ориентироваться в быстро меняющихся социально-экономических ситуациях, обладать определенным набором профессиональных компетенций, обновлению и адаптации их в различных ситуациях.

Как известно, критериев для оценки качества подготовки будущего специалиста довольно много, но одним из важнейших остается конкурентоспособность выпускника на рынке труда. Собственно, этим же определяется и конкурентоспособность вуза.

Не секрет, что ни одна программа обучения, какой бы продолжительностью она ни была, не дает подготовить специалиста, готового решать профессиональные задачи в течение всей своей деятельности.

Следовательно, задача вуза состоит во внедрении инновационных механизмов, методов и средств обучения для подготовки специалиста, способного работать в стремительно меняющихся условиях (технологии, средства производства, нормы, правила, требования, профессиональное партнерство, задачи и т.п.), то есть готового совершенствоваться всю жизнь.

Новые образовательные стандарты дают право вузам определять профессиональные компетенции в соответствии с профессиональными стандартами, то есть разрабатывать основную образовательную программу (ООП), нацеленную на формирование компетенций, позволяющих выпускнику, при условии их освоения, быть востребованным на рынке труда, адаптироваться на начальном этапе своей профессиональной деятельности, и в дальнейшем соответствовать требованиям занимаемой должности и работодателя.

Однако, как показывает мой личный опыт, реализация учебного плана подготовки специалиста в рамках образовательного стандарта, исполнение которого образовательным учреждением обязательно, не дает или дает не в полной мере должного результата, то есть подготовки такого специалиста.

До сих пор в большинстве вузов отсутствует межкафедральная связь в части определения содержания рабочих программ по дисциплинам, что, собственно, в прежней вузовской подготовке всегда присутствовало, а именно разработка ООП на основе междисциплинарных и предметных связей [1].

При междисциплинарном подходе учебные дисциплины и даже отдельные разделы и темы в них рассматриваются как части определенных ступеней иерархии профессиональной подготовки.

И это необходимо, поскольку современные производства требуют принципиально новых технических и технологических подходов, которые могут разработать только специалисты, способные интегрировать идеи из различных областей науки, оперировать междисциплинарными категориями, комплексно воспринимать инновационный процесс.

В настоящее время это возможно реализовать, в том числе и с использованием BIM-технологий (Building Information Modeling -Информационное Моделирование Зданий или сооружений), которые уже давно и надолго вошли в нашу жизнь, а именно в решение вопросов проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений различного назначения, а также выполнения пожарно-технической экспертизы объекта на любой стадий его жизненного цикла.

BIM-модель содержит информацию об интеллектуальных объектах в нее входящих и параметрических взаимосвязях между ними, что позволяет принимать управленческие решения на любом из перечисленных выше этапов, при этом новые данные в информационную модель могут добавляться на протяжении всего жизненного цикла строительного объекта.

С использованием BIM-технологий предлагается в рамках освоения основной образовательной программы с целью формирования профессиональных компетенций знакомить обучающихся с комплексным подходом обеспечения пожарной безопасности здания и огнестойкости всего здания в целом и отдельно его строительных конструкций на этапах проектирования и эксплуатации объекта.

С использованием Autodesk Revit как одного из программных продуктов, реализующих BIM-технологии, позволяющего выполнять архитектурно-строительное проектирование, проектирование инженерных систем зданий и строительных конструкций, можно получить представление о данных по обеспечению пожарной безопасности строительного объекта и выполнять экспертизу уже готовых решений: категорирование помещений по пожарной опасности; устройства пожарных проездов и подъездных путей для пожарной техники; конструктивных особенностей и количества наружных пожарных лестниц; лестничных клеток; соответствия эвакуационных путей, количества и размеров аварийных и эвакуационных выходов требованиям безопасной эвакуации людей при пожаре (рис. 1, 2); пожарных отсеков и противопожарных преград; системы водоснабжения, в том числе в объеме систем внутреннего противопожарного водопровода и автоматической системы водяного пожаротушения; внутренних систем отопления, вентиляции, кондиционирования, электроснабжения, пожарной сигнализации, противодымной защиты, автоматики (рис.3) [1-5].

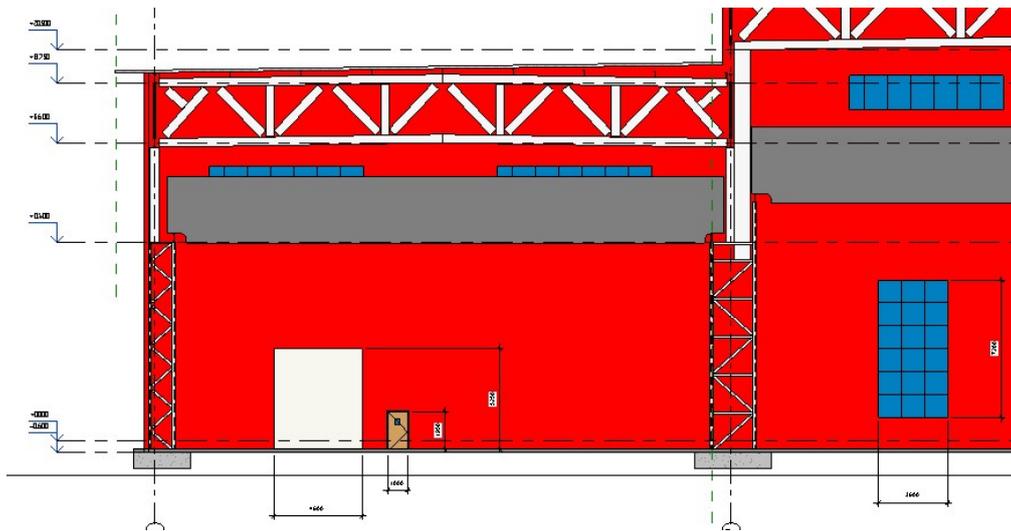


Рис 1. Экспертиза аварийных и эвакуационных выходов

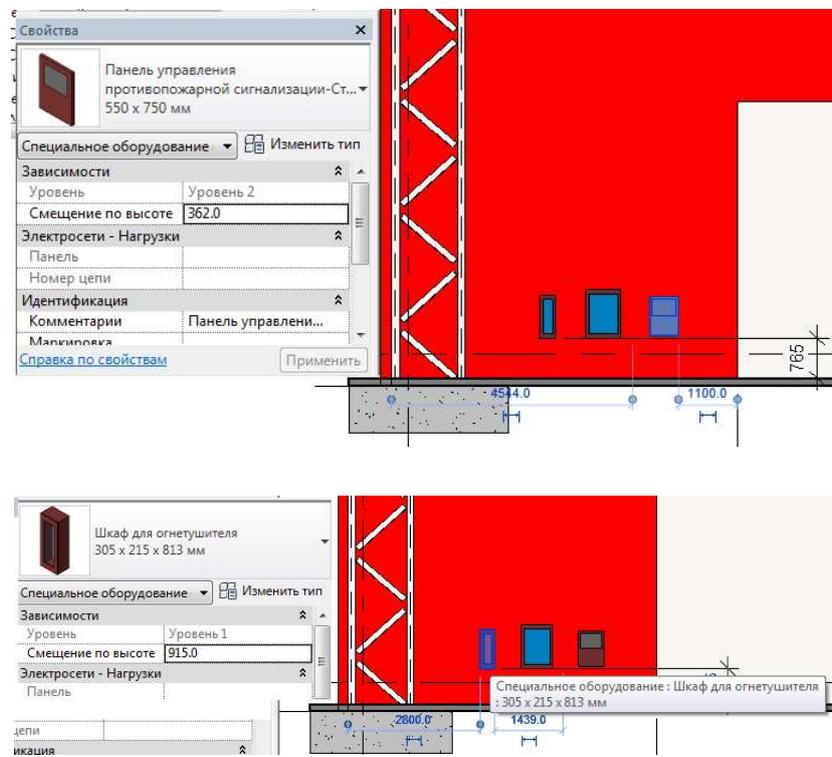
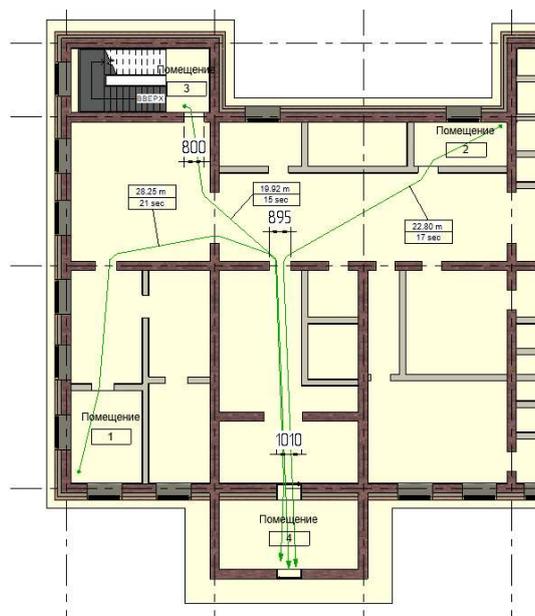


Рис. 2 Экспертиза расстановки оборудования систем пожаротушения и пожарной сигнализации



«Спецификация траектории движения»								
А	В	С	Д	Е	Ф	Г	Н	И
В помещении	Время	Длина	Из помещения	Имя вида	Линия детализации	Скорость	Уровень	Число
Помещение 4	21.1 с	28252	Помещение 1	Первый этаж	Да	4.8 км/ч	Первый этаж	1
Помещение 4	17.0 с	22805	Помещение 2	Первый этаж	Да	4.8 км/ч	Первый этаж	1
Помещение 4	14.9 с	19916	Помещение 3	Первый этаж	Да	4.8 км/ч	Первый этаж	1

Рис. 3. Анализ траектории эвакуации людей из здания

Данный программный продукт легко интегрируется со многими программно-вычислительными комплексами (Autodesk Robot Structural Analysis Professional, SOFiSTiK, ANSYS, SCAD, ЛИРА-САПР и другие), что дает возможность загрузить модель отдельной строительной конструкции или модель здания в целом для выполнения статического, динамического и теплового расчетов, позволяющих рассчитать распределение во времени температурных полей в конструкции, испытывающей статическую, динамическую и пожарную нагрузки.

Известно, что согласно ст. 51 и 52 ФЗ 123 [6], одной из задач, направленных на реализацию цели создания систем противопожарной защиты является применение основных строительных конструкций с пределами огнестойкости и классами пожарной опасности, соответствующими требуемому степени огнестойкости и классу конструктивной пожарной опасности зданий и сооружений, а также с ограничением пожарной опасности поверхностных слоев (отделок, облицовок и средств огнезащиты) строительных конструкций на путях эвакуации.

Среди вопросов, которые изучает дисциплина «Здания, сооружения и их устойчивость при пожарах», наиболее сложной для обучающихся представляется задача определения огнестойкости строительных конструкций, в частности железобетонных конструкций.

Кроме того, следует отметить, что с развитием численных методов в ряде случаев для оценки поведения строительной конструкций под действием высоких температур используют компьютерное моделирование вместо дорогостоящих натуральных испытаний на огнестойкость.

С целью снижения трудоемкости и повышения эффективности проведения анализа предпринимаются попытки использования метода конечных элементов (МКЭ), который позволяет анализировать сложные системы с многообразием взаимосвязей между элементами внутри модели и внешним воздействием окружающей среды.

Точность современных программных комплексов сравнима с реальными испытаниями, а возможность учесть комплекс различных факторов пожара может гарантировать высокую приближенность к реальным ситуациям [7].

Поэтому в рамках изучения вопроса определения фактического предела огнестойкости железобетонной конструкции обучающимся предлагается выполнить расчеты двумя способами: «ручным» способом на основе известных положений и методик, изложенных в действующих нормативных документах,

и «машинным» с использованием программно-вычислительных комплексов, что позволит не только выявить сходимость полученных результатов, но рассмотреть варианты поведения конструкции при различных условиях (вид и значение силовой нагрузки, пожарная нагрузка, время воздействия, геометрические характеристики конструкции и материалы и др.).

Программные комплексы для расчетов огнестойкости и моделирования поведения конструкций при пожаре широко применяют для железобетонных конструкций. Для стальных и деревянных конструкций существует ограниченное количество программ, имеющих приложения, позволяющие моделировать различные сценарии пожара [7].

Среди современных программных комплексов достаточно альтернатив для расчета огнестойкости как отдельных элементов, так и целых сооружений.

Выбор какой-либо программы зависит от сложности пользовательской задачи. В таблице 1 представлена информация о возможностях некоторых программных комплексов, используемых в России и за рубежом для оценки огнестойкости и огнесохранности строительных конструкций [7].

В Европе для расчета огнестойкости используют Abaqus и SOFiStiK; в США также применяется SOFiStiK, но преимущество, все-таки, остается за ANSYS, который однозначно лидирует, поскольку обладает большим количеством функций и инструментов для моделирования зданий и строительных конструкций, а также симуляции пожара в заданной локации. При этом программный продукт ANSYS в отличие от других зарубежных программ, в которых заложены европейские нормы проектирования, не привязан к последним, что дает возможность задавать необходимые условия при создании модели.

Таблица 1. Анализ возможностей программных комплексов для расчета огнестойкости строительных конструкций

Характеристика		Программный комплекс						
		Abaqus	ANSYS	NormCAD	SOFiStiK	Robot	ELCUT	ЛИРА-САПР
Возможности предпроцессора	Экспорт 3D-модели из Revit	-	+	-	+	+	-	+
	Графический построитель 2D /3D	+	+	-	+	+	-	+
	Возможность задать огнезащиту в программе	+	+	-	+	+	-	-
	Встроенные характеристики материалов конструкций	-	+	+	+	+	+	+
Расчетный модуль	Учет нагрузок на несущие конструкции	+	+	+	+	+	-	+
	Моделирование режимов пожара	+	+	-	+	-	-	+
	Возможность расчета с учетом типовой арматуры	-	-	+	+	+	+	+
Возможности постпроцессора	Визуализация распределения температуры в конструкции	-	+	-	+	+	+	+
	Визуализация деформаций КЭ-сетки	+	+	-	+	+	+	+
	Вывод отчета, соответствующего требованиям экспертизы	-	-	+	-	-	-	-
Разработчик		США	США	РФ	ФРГ	США	РФ	РФ

В России с 2019 года появилась возможность выполнять расчет огнестойкости железобетонных конструкций в программном комплексе ЛИРА-САПР, который позволяет выполнять подбор армирования для обеспечения требуемого предела огнестойкости на основании положений, изложенных в СТО 36554501-006-2006 [8] с использованием нелинейно-деформационной теории. Решение задачи сводится к вычислению распределения температур по сечению, в соответствии с заданным периодом времени в условиях пожара с дальнейшей корректировкой физико-механических характеристик материалов на основании полученных температурных полей.

Кроме того, возможно выполнить проверку несущей способности элементов конструкции на действие нормативной нагрузки и в случае невыполнения требований увеличить процент армирования. Расчет огнестойкости реализован для стандартных типов сечений, в том числе и для сталежелезобетонных

и пластинчатых элементов конструкций [9]. В программе реализована возможность задания параметров температурных воздействий и анализа распределения температур по сечению.

Использование специализированных расчетных программ на стадии оптимизации параметров конструкции и принятия решений позволяет существенно увеличить эффективность исследовательской работы.

В качестве примера в статье приводится решение теплотехнической задачи в рамках исследования огнестойкости пустотной железобетонной плиты, которая выполнялась на базе платформы ANSYS Workbench.

Решение задачи нестационарной теплопроводности сводится к определению температуры бетона и арматуры в некоторой точке поперечного сечения элемента в заданный момент времени. Функциональная зависимость температуры описывается дифференциальным уравнением теплопроводности Фурье при нелинейных граничных условиях и сложном процессе тепло- и массопереноса. Эта задача успешно решается в модуле нестационарной теплопроводности Transient Thermal в программе ANSYS [10].

Исходными для численного анализа огнестойкости железобетонной многпустотной плиты были приняты данные, представленные в таблице, а также сведения о геометрических характеристиках плиты и материалах: многпустотная плита перекрытия типа 1 ПК ГОСТ 9561-2016 [11] в здании III степени огнестойкости; нормируемый предел огнестойкости плиты перекрытия REI 45; размеры сечения: b - 1500 мм (номинальная) и 1490 мм (расчетная) ширина плиты; длина рабочего пролета $l = 6$ м; высота сечения плиты $h = 220$ мм; толщина защитного слоя $a = 20$ мм; диаметр пустот $d = 159$ мм; полная нормативная нагрузка $q_n = 3,456$ кПа (постоянная) + 2,5 кПа (длительная) = 5,956 \approx 6,0 (кПа) (см. табл. 2); ширина полки приведенного сечения $b'_f = b - 40 = 1500 - 1460$ (мм); высота полки приведенного сечения $h'_f = 30,5$ (мм); рабочая продольная арматура 8 \emptyset 14 мм класса А400 общей площадью $A_s = 12,31$ см²; плита выполнена из тяжелого бетона класса В30 с весовой влажностью бетона – 3,0% и средней плотностью бетона $\rho_o = 2500$ кг/м³; характеристика материалов: бетон тяжелый класса В30: $R_{bn} = 22$ МПа; $R_b = 17$ МПа; $R_{bt} = 1,15$ МПа; $R_{bt,n} = 1,75$ МПа; $E_b = 32,5 \cdot 10^3$ МПа; арматура продольных ребер: класса А400: $R_{sn} = 400$ МПа; $R_s = 350$ МПа; $E_s = 2,0 \cdot 10^5$ МПа.

Таблица 2. Сбор нагрузок

Вид нагрузки	Норма-тивная нагрузка, кПа	Коэф-фициент надежности по нагрузке	Рас-четная нагрузка, кПа
Постоянная (g)	3,456	-	3,973
1. Керамическая плитка: $\delta=10$ мм; $\gamma = 20$ кН/м ³	0,2	1,3	0,26
2. Цементный клей: $\delta=20$ мм; $\gamma = 20$ кН/м ³	0,4	1,3	0,52
3. Битумная гидроизоляция: $\delta=8$ мм; $\gamma = 7$ кН/м ³	0,056	1,3	0,073
4. Цементно-песчаная стяжка: $\delta=10$ мм; $\gamma = 18$ кН/м ³	0,18	1,3	0,23
5. Минвата: $\delta=60$ мм; $\gamma = 2$ кН/м ³	0,12	1,2	0,14
4. Железобетонная пустотная плита: $\delta=220$ мм; $\gamma = 25$ кН/м ³	2,5	1,1	2,75
Временная (v), в т.ч.	4,5	-	5,15
- длительная (v1)	2,5	1,1	2,75
- кратковременная (v2)	2,0	1,2	2,4
Полная (q), в т.ч.	7,956	-	9,123
- постоянная и длительная	5,956	-	6,723
- кратковременная	2,0	-	2,4

Для моделирования бетона применялся конечный элемент SOLID65 – специальный объемный шестигранный восьмиузловой элемент с тремя степенями свободы в узле и дополнительными функциями формы внутриэлементных перемещений для повышения точности.

Арматурные стержни моделировались конечным элементом BEAM188 – пространственный линейный элемент балки, имеющий 3 узла: 2 «содержательных» узла располагаются на оси элемента (по краям), третий является узлом ориентации и может быть общим для нескольких элементов.

Расчетная схема разбита на конечные элементы размерами 20 × 20 × 20 мм. На модель одновременно действуют загрузки: собственный вес плиты, нагрузка от устройства пола, длительная эксплуатационная нагрузка и температурное воздействие. Общий вид расчетной схемы представлен на рисунке 4. Прочностные характеристики конструкции были приняты согласно значениям, соответствующим классу бетона и арматуры. Расчёт проводился в физически нелинейной постановке.

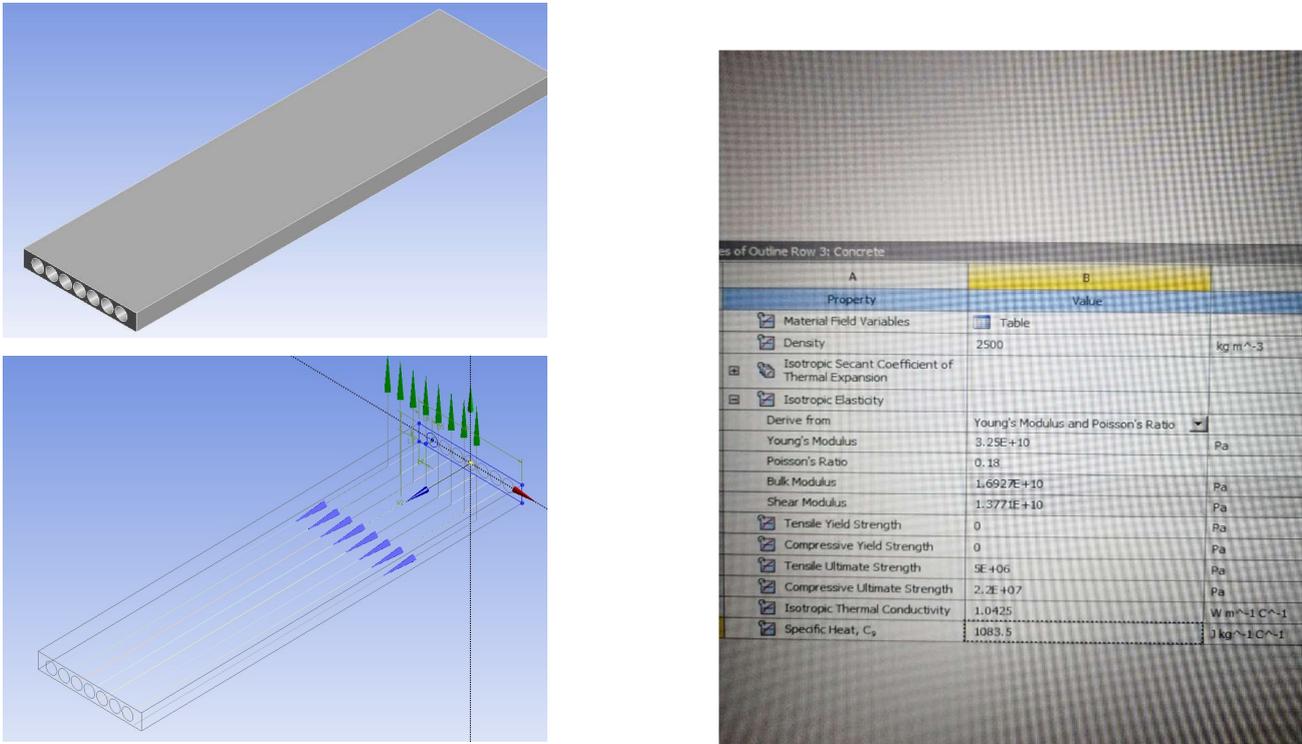


Рис 4. Задание геометрии плиты и нагрузок

Результаты статического и теплотехнического расчетов показали, что несущая способность плиты при ее нагреве со стороны растянутой зоны удовлетворяет заданным активным нагрузкам: прогиб плиты, равный 27 мм, удовлетворяет предельно допустимому (30-40 мм) СП 63.13330.2018 [12], что вполне согласуется с результатами «ручного» расчета. Программный комплекс ANSYS с вполне может быть рекомендован при изучении вопросов огнестойкости железобетонных конструкций и каркасного сооружения в целом.

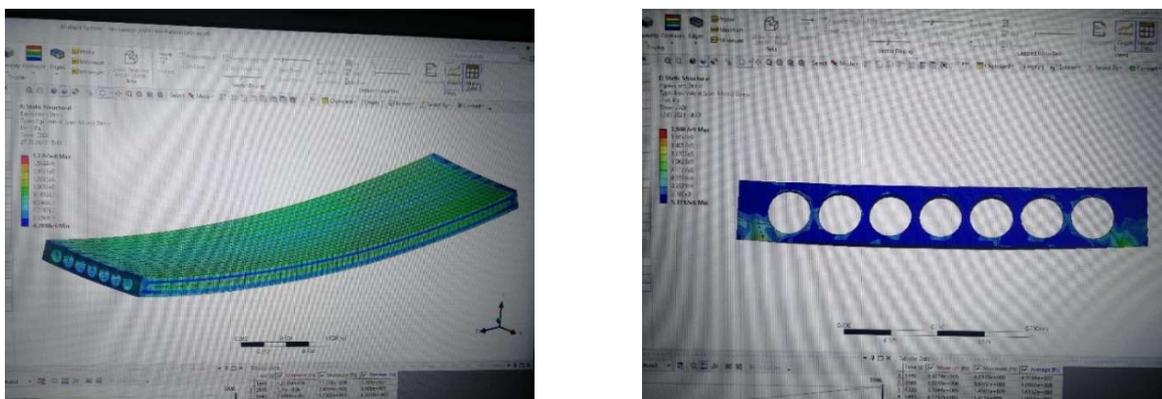


Рис 5. Поведение плиты в условиях 2-х часового прогрева

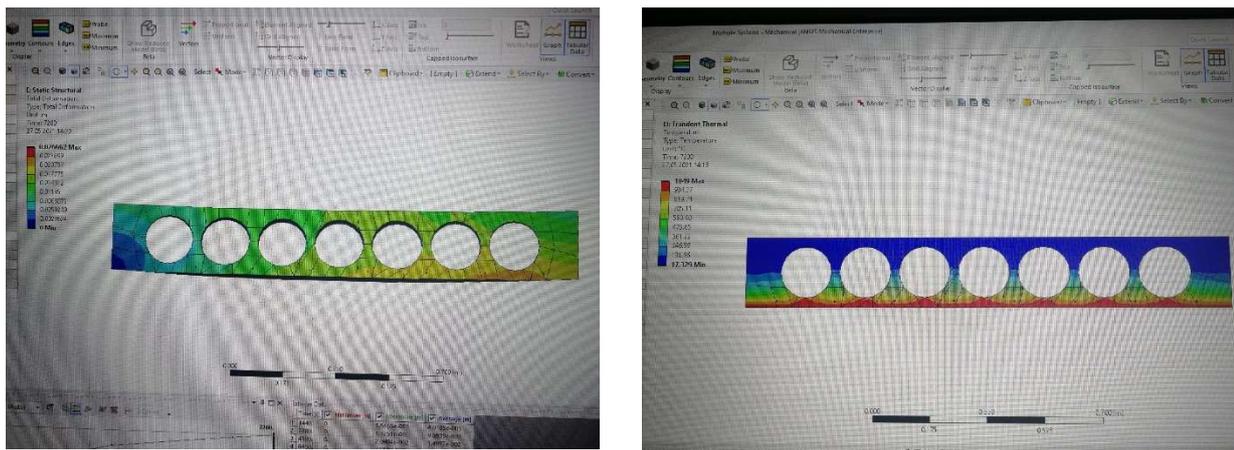


Рис 6. Температура обогреваемой растянутой зоны плиты через 2 часа

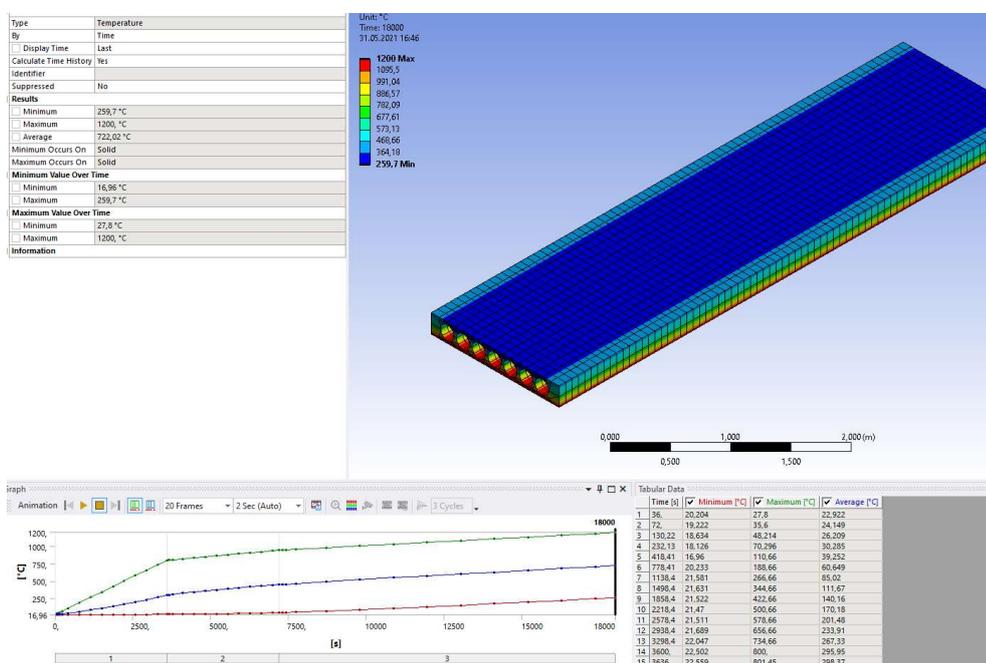


Рис 7. Иллюстрации к теплотехническому расчету

Другой довольно известный программно-вычислительный комплекс Autodesk Robot Professional позволяет исследовать поведение железобетонных, металлических и деревянных конструкций в условиях повышенных температур.

На лекционных занятиях при изучении вопросов огнестойкости железобетонных сжатых элементов был рассмотрен пример решения теплотехнической задачи при оценке огнестойкости центрально сжатой (нормативная нагрузка $N_n = 1837$ кН) железобетонной колонны сечением $0,4 \times 0,4$ м длиной 6,0 м, выполненной из бетона на силикатном заполнителе класса В20 со средней плотностью $\rho_0 = 2450$ кг/м³, весовой влажностью $W_b = 3,5\%$ и с рабочей продольной арматурой класса А400 4Ø28.

Аналитическая модель колонны содержит всю информацию о ней: геометрические параметры колонны, материалы, типы связей, приложенная нагрузка (рис. 8).

Известный своей сложностью теплотехнический расчет сжатого элемента выполняется довольно быстро, при этом позволяет получить визуализацию температурных расчетов, представленных в виде карты в поперечном сечении (рис. 9), на которой отражаются значения минимальной и максимальной температуры. Кроме того, можно получить информацию о температуре прогрева арматуры и бетона в конкретной точке при любом заданном периоде прогрева.

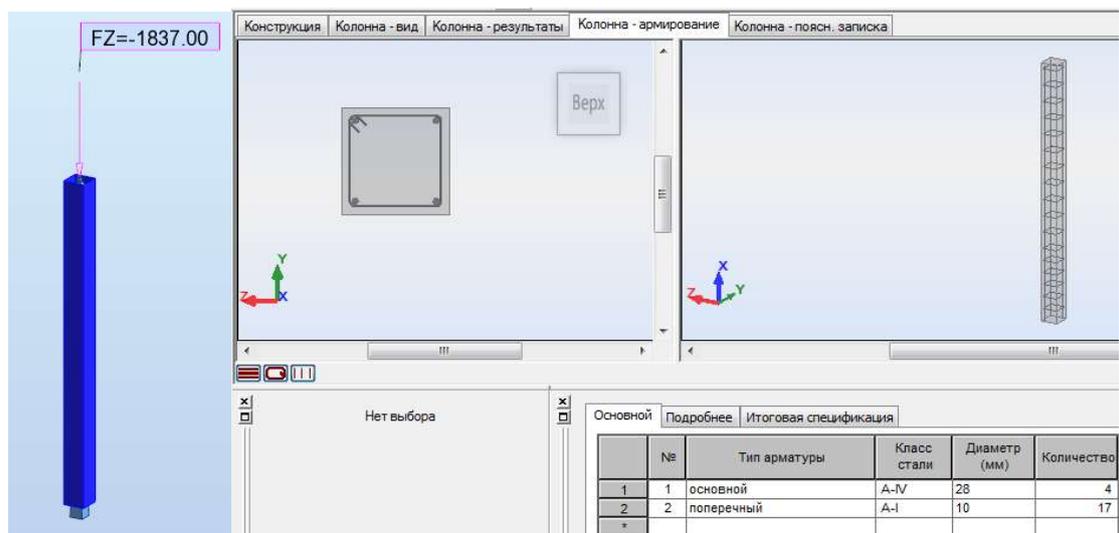


Рис. 8. Задание аналитической модели колонны и фактическое армирование

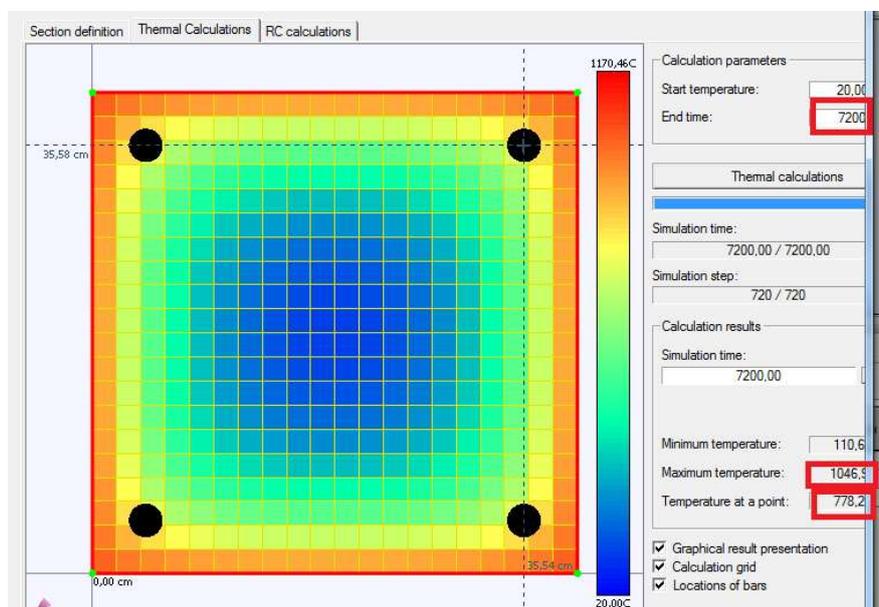


Рис. 9. Решение задачи в Autodesk Robot (2 часа нагрева)

В заключении следует отметить, что в связи необходимостью повышения качества подготовки специалистов в области пожарной и техносферной безопасности необходимо внедрять современные программы систем автоматизированного проектирования (САПР) и программно-вычислительные комплексы при изучении специальных дисциплин профессионального блока и выполнении обучающимися научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы.

Литература

1. Голдобина, Л.А. Использование систем автоматизированного проектирования для реализации междисциплинарных связей в образовательном процессе высшей школы / Голдобина Л.А. // Научно-аналитический журнал «Сибирский пожарно-спасательный вестник», 2021, №2. - С.90-98.- URL: http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2021/v2/N21_90-98.pdf, свободный. – Загл. с экрана. — Яз. рус., англ. (дата обращения: 16.09.2021). Текст : электронный.
2. Грузков, А.А. Анализ длины пути эвакуации / А.А. Грузков. - Текст : электронный // Тенденции развития науки и образования. № 57-1, 2019. – С. 10 -13. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_43050221_11009042.pdf (дата обращения: 16.09.2021).

3. Индустрия безопасности: Информационное агентство. BIM внедряют в практику экспертной деятельности в строительстве. - URL: https://www.securitymedia.ru/news_one_11524.html (дата обращения: 16.09.2021). – Текст : электронный.

4. Кирик, Е.С. Компьютерное моделирование развития пожара и эвакуации в парадигме BIM / Е.С. Кирик. – Текст : электронный // Научно-аналитический журнал: «Сибирский пожарно-спасательный вестник», № 1, 2016. – С. 25 -31. –URL: <http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2016/v1/25-31.pdf> (дата обращения: 16.09.2021).

5. Некрасова, А.О. Информационное моделирование как перспективное решение в обеспечении техники безопасности. – Текст : электронный // Сборник статей X Международной научно-практической конференции. В 2 частях. – СПб.: Издательство: МЦНС «Наука и Просвещение», 2018. - С. 102–106. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_35038759_31668832.pdf (дата обращения: 16.09.2021). Текст : электронный.

6. Федеральный закон "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" от 22.07.2008 N 123-ФЗ (последняя редакция) (ред. от 30.04.2021) «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» : [принят Государственной думой 4 июля 2008 года : одобрен Советом Федерации 11 июля 2008 года]. – Документ предоставлен КонсультантПлюс. - URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/6e24082b0e98e57a0d005f9c20016b1393e16380/(дата обращения:09.06.2021). Текст : электронный.

7. Гравит, М.В. Моделирование огнестойкости конструкций в программных комплексах, в том числе с использованием огнезащиты / М.В. Гравит. – Текст : электронный // Лакокрасочные материалы и их применение, 2020, № 9. – С. 36-42. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/344338857_MODELIROVANIE_OGNESTOJKOSTI_KONSTRUKCIJ_V_PROGRAMMNYH_KOMPLEKSAH_V_TOM_CISLE_S_ISPOLZOVANIEM_OGNEZASITITY (дата обращения: 16.09.2021). Текст : электронный.

8. СТО 36554501-006-2006 «Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций». Дата введения - 1 ноября 2006 г.–М.: ФГУП НИЦ «Строительство», 2006–83с

9. ЛИРА-САПР — система проектирования и расчета зданий и сооружений. – Режим доступа: <https://rflira.ru/products/lirasapr/fire/> (дата обращения: 16.09.2021). Текст : электронный.

10. Ефрюшин, С.В. Численное моделирование огнестойкости железобетонной плиты с помощью программного комплекса ANSYS / С. В. Ефрюшин, В. В. Юрьев. – Текст : электронный // Строительная механика и конструкции, № 4(23), 2019– С. 86-92. -URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_41587768_86616952.pdf (дата обращения: 16.09.2021).

11. ГОСТ 9561–2016. Межгосударственный стандарт. Плиты перекрытий железобетонные многопустотные для зданий и сооружений. Технические условия. – 24 с. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200141739> (дата обращения: 16.09.2021). Текст: электронный.

12. СП 63.13330.2018. бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Дата введения 2019–06–20 / исполнитель АО "НИЦ "Строительство" - НИИЖБ им. А.А. Гвоздева. – 124 с. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/554403082> (дата обращения: 16.09.2021). Текст: электронный.