

УДК 624.012:53.09

РАСЧЕТ ОГНЕСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ ПО УТОЧНЕННЫМ И УПРОЩЕННЫМ МЕТОДАМ

Д-р техн. наук С. Л. Фомин, канд. техн. наук И. А. Плахотникова,
студентка А. А. Парафенко (ХНУСА)

РОЗРАХУНОК ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ ПЕРЕКРИТТЯ ЗА УТОЧНЕНИМИ І СПРОЩЕНИМИ МЕТОДАМИ

Д-р техн. наук С. Л. Фомін, канд. техн. наук І. А. Плахотникова,
студентка А. О. Парафенко (ХНУБА)

CALCULATION OF FIRE CONCRETE FLOOR SLABS REFINING AND SIMPLIFIED METHOD

Dr. Sc. Sciences S. L. Fomin, cand. tehn. sciences I. A. Plahotnikova Sciences,
Student A. A. Parafenko

Проведены численные исследования расчета огнестойкости железобетонных конструкций по уточненным и упрощенным методам на примерах расчета железобетонных плит перекрытия. Разработан уточненный метод расчета, основанный на использовании компьютерных технологий, нелинейных методов, учитывающий изменение механических свойств материалов от температуры. Проведенные расчеты железобетонной плиты по различным методам показали, что наибольшей достоверностью обладает предложенный уточненный метод расчета.

Ключевые слова: огнестойкость, упрощенные методы расчета, нелинейный уточненный метод, сравнение результатов расчетов.

Проведено чисельні дослідження розрахунку вогнестійкості залізобетонних конструкцій за уточненими і спрощеними методами на прикладах розрахунку залізобетонних плит перекриття. Розроблено уточнений метод розрахунку, заснований на використанні комп'ютерних технологій, нелінійних методів, що враховує зміну механічних властивостей матеріалів від температури. Проведені розрахунки залізобетонної плити за різними методиками показали, що найбільшою вірогідністю володіє запропонований уточнений метод розрахунку.

Ключові слова: вогнестійкість, спрощені методи розрахунку, нелінійний уточнений метод, порівняння результатів розрахунків.

Numerical study of calculation of fire resistance of reinforced concrete structures according to updated and simplified methods is performed on concrete slabs. Calculations are considered elements using tables method isotherm 500 ° C, zone method. A revised calculation method based on the use of computer technology, nonlinear methods, based on the basic principles and assumptions of the theory of heat conduction, certain principles and assumptions of structural mechanics, which takes into account changes in mechanical properties with temperature.

For the creation of non-linear analysis of finite element calculation scheme can be carried out in two ways. First, the simplest, involves the use of a physically nonlinear finite element versatile rod for columns and physically nonlinear universal rectangular shell (and / or triangular

shell) for overlap. The second option is more complicated, but more accurate, based on a physically non-linear finite element space, for example, physically nonlinear isoparametric universal octagonal space.

Calculations of concrete slabs on various methods, which showed that the greatest certainty has proposed a revised calculation method.

Keywords: fire, easy payment methods, nonlinear refined method, the comparison of the calculation results.

Вступление. Предельное состояние конструкции по огнестойкости – состояние конструкции, при котором она теряет несущую способность или защитные функции в условиях пожара.

Различают три предельных состояния конструкций по огнестойкости:

- 1) предельное состояние по признаку потери несущей способности (R);
- 2) предельное состояние по признаку потери целостности (E);
- 3) предельное состояние по признаку потери теплоизолирующей способности (I) [1].

При проектировании используются методы с опорой на следующее: 1) расчет отдельных элементов; 2) расчет частей сооружения; 3) расчет сооружения в целом.

При расчете отдельных элементов, который включает применение упрощенных методов – табличных данных, учитывается только влияние перепадов (градиентов) температур в поперечном сечении; эффектами температурного расширения в осевом направлении или в плане пренебрегают. Кроме того, предполагается, что граничные условия в течение пожара остаются неизменными [2].

Если рассчитывается часть сооружения, она изолируется таким образом, что при расчете могут быть приняты стационарные (неизменные во времени) граничные условия. В пределах изолированной части сооружения должен учитываться соответствующий вид разрушения при огневом воздействии, применяются упрощенные методы, не применяются табличные данные, используют свойства материалов,

зависящие от температуры, эффекты теплового расширения и деформации.

При расчете всего сооружения не используется ни одна из рассмотренных выше предпосылок, проводится общий уточненный расчет с учетом зависящих от температуры свойств материалов, жесткости элементов, эффектов теплового расширения и деформаций. В Еврокоде [3] приводится лишь краткое руководство для второго и третьего из вышеперечисленных методов.

Приведенные «альтернативные методики расчета» имеют разную степень достоверности и не могут обеспечить гарантированную надежность пожарной безопасности зданий и сооружений, хотя каждая из методик имеет свою научную и практическую ценность. По мнению французских исследователей Б. Бартеlemi и Ж. Крюппа [4], эти методы, разработанные на основе экспериментальных исследований, касаются лишь частных случаев, а их простота оплачивается недостаточно обеспеченной безопасностью. В частности, в них не учитывается напряженное состояние конструкций, поэтому наиболее надежным является общий (третий) метод проверки.

Поставлена проблема изучения различия указанных методик на примерах расчета огнестойкости железобетонных плит перекрытия по уточненным и упрощенным методам.

Анализ последних исследований и публикаций. Как было указано ранее, в таблице 0.1 Еврокода [3] приводятся лишь основные положения уточненных моделей расчета для третьего метода. Они должны базироваться на фундаментальных

физических предпосылках, которые приводят для получения наиболее достоверных данных об ожидаемой работе соответствующего конструктивного элемента во время пожара (п.4.3.1-4.3.2 [3]). Уточненные методы включают расчетные модели для определения следующего: увеличения и распространения температуры во всех элементах конструкции (теплотехнический расчет); механической работы конструктивной системы или какой-либо ее части (статический расчет). Уточненные методы расчета для теплотехнической части должны базироваться на основных принципах и допущениях теории теплопроводности; для статической части – базироваться на определенных принципах и допущениях строительной механики, учитывая изменение механических свойств от температуры.

Таким образом, в Еврокоде [3] сформулированы основные требования для создания расчетной модели уточненного метода. Инженерная методика отсутствует, что вынуждает при проектировании использовать упрощенные методики, рассмотренные ниже.

Расчет элементов с использованием таблиц. Область применения

В разделе 5 EN 1992-1-2 [3] установлены минимальные размеры и расстояния от поверхности элемента до центра тяжести ближайшего к ней ряда арматуры (защитный слой бетона плюс половина диаметра арматурного стержня) для различных типов конструктивных элементов при воздействии огня в течение 30, 60, 90, 120, 180 и 240 мин. Также приведены некоторые требования по конструированию. Рассматриваются такие элементы, как колонны, несущие и ненесущие стены, балки (шарнирно опертые и неразрезные), плиты (шарнирно опертые и неразрезные, одно- и двухпролетные плиты, сплошные и ребристые, а также плоские плиты).

Табличные значения применимы к бетону на кремнеземистых заполнителях плотностью в диапазоне 2000-2600 кг/м³. Если используется легкий заполнитель, табличные значения минимальных размеров плит и балок могут быть снижены на 10 %.

Еврокод требует устройства приповерхностного армирования для предотвращения разрушения защитного слоя бетона, если расстояние от поверхности элемента до центра тяжести ближайшего к ней ряда арматуры (осевое расстояние) превышает 70 мм.

Обоснование табличных данных.

Таблицы разработаны на эмпирической основе, на базе общеевропейского опыта и теоретической оценки результатов испытаний. Данные для обычных типов конструктивных элементов получены с использованием приближенных и консервативных допущений [5].

Если толщина стен и плит соответствует минимальным размерам, можно предположить, что критерии по целостности и изоляции для разделительной функции удовлетворяются.

Для функции восприятия нагрузки применимы следующие допущения:

$$E_{d,fi}/R_{d,fi} \leq 1,0, \quad (1)$$

где $E_{d,fi}$ – расчетный эффект воздействия в условиях пожара;

$R_{d,fi}$ – расчетное сопротивление элемента в условиях пожара.

Если не указано иное, предполагается, что

$$\eta_{fi} = E_{d,fi}/E_d = 0,7, \quad (2)$$

где E_d – расчетный эффект воздействий при нормальной температуре.

Критической температурой для арматуры, θ_{cr} (температура арматуры, при которой в условиях пожара при данном уровне напряжения стали предполагается

разрушение элемента) является температура 500°C . При этом принимается, что уровень напряжения равен $\sigma_{s,fi}/f_{yk}=0,6$, $\eta_{fi}=0,7$ и $\gamma_s=1,15$.

Для предварительно напряженных арматурных элементов $\theta_{cr}=400^{\circ}\text{C}$, для предварительно напряженной проволочной и прядевой арматуры $\theta_{cr}=350^{\circ}\text{C}$. Уровень напряжений и для тех, и для других принимается равным 0,55.

Толщина плит приведена в таблицах в целях обеспечения адекватности разделительной функции и может в дополнение к толщине конструкции перекрытия включать толщину любого несгораемого покрытия пола.

Осевое расстояние, приведенное в таблицах, необходимо сравнить так: 1) с осевым расстоянием до отдельного ряда арматуры того же самого диаметра; 2) с увеличенным осевым расстоянием стержней в случае многорядного армирования или арматуры различных диаметров.

Элементарные методы расчета. В приложениях В и Е [3] приведены три метода расчета, которые нашли применение на практике.

Метод изотермы 500°C . Данный метод требует знания о распределении температур по поперечному сечению элемента. В приложении А к EN 1992-1-2 [3] приводится такое распределение температур для плит, балок и колонн с учетом стандартной зависимости «время - температура». Метод может быть применен к элементам, минимальная ширина поперечного сечения которых удовлетворяет значениям, указанным в табл. В.1 [3].

Сначала определяется толщина зоны, поврежденной тепловым воздействием. Она определяется как средняя глубина изотермы 500°C , расположенной в сжатой зоне поперечного сечения. Поврежденный бетон исключается из расчета в предположении, что он не участвует в восприятии нагрузок. Считается, что

оставшееся поперечное сечение сохраняет исходные параметры по сопротивлению и модулю упругости.

Несмотря на то, что некоторые арматурные стержни могут располагаться за пределами уменьшенного поперечного сечения, они все же принимаются в расчет. При вычислениях сопротивление всей арматуры уменьшается путем применения понижающих коэффициентов для соответствующей температуры.

Таким образом, с учетом приведенных выше предпосылок задача сводится к вычислению сопротивления поперечного сечения с использованием методов расчета для нормальных температурных условий.

Метод зон. Данный метод является более трудоемким, но более точным, чем метод изотермы 500°C . Первым этапом расчета является определение толщины a_z зоны, поврежденной при пожаре. Эта процедура выполняется для эквивалентной стены, подвергнутой воздействию огня с обеих сторон. Толщина эквивалентной стены – это действительная толщина элементов, подвергнутых воздействию огня с противоположных сторон (например, стен, ребер балок, прямоугольных колонн). Эта толщина в два раза превышает действительную толщину, если элементы были подвергнуты воздействию огня только с одной стороны (например, плиты). Процедура заключается в следующем: половина толщины эквивалентной стены делится на ряд (минимум 3) параллельных зон.

Используя рис. В.5,а или графики в разделе 4 EN 1992-1-2 [3], в сочетании с температурным профилем в приложении А [3], оценивается коэффициент снижения ($k_c(\theta_i)$) в центре каждой зоны и по средней линии эквивалентной стены ($k_c(\theta_m)$). В Еврокоде приводятся формулы для расчета среднего коэффициента понижения для половины ширины эквивалентной стены и толщины поврежденного сечения a_z .

Расчет сопротивления с уменьшенным поперечным сечением продолжается далее по методу изотермы 500°C.

Метод приложения Е. Это полезное приложение для расчета сопротивления балок и плит, подвергнутых воздействию пожара. Рекомендации даны для свободно опертых и неразрезных элементов.

Определение цели и задач исследования. Целью исследования является оценка надежности расчета огнестойкости железобетонных конструкций различными методами. Задачами исследования поставлено сравнение результатов расчетов по уточненным и упрощенным методам на примерах расчета огнестойкости железобетонных плит перекрытия.

Основная часть исследования. Расчет уточненным методом. В ХНУСА разработан уточненный метод расчета, основанный на анализе всей конструктивной системы, когда любая или только одна из ее частей находится под влиянием пожара [6]. Методика расчета ориентирована на использование компьютерных технологий, например, нелинейных методов ПК Лира.

По ДБН В.1.1-7 [7] выбирают степень огнестойкости здания и соответствующие классы огнестойкости $t_{fi, requ}$ строительных конструкций в минутах по ряду: 30; 60; 90; 120; 180; 240.

Расчет проводится по признаку потери несущей способности (R).

Расчетные пределы огнестойкости конструкций $t_{fi, d}$ сравнивают с нормированными значениями. Конструкция соответствует нормированной степени огнестойкости, если соблюдается условие

$$E_{d, t, fi} \leq R_{d, t, fi}, \text{ то } t_{fi, d} \geq t_{fi, requ}, \quad (3)$$

где $R_{d, t, fi}$ – расчетное значение несущей способности отдельной конструкции в процессе пожара в момент времени t ;

$E_{d, t, fi}$ – расчетное значение загрузочного эффекта в процессе пожара в момент времени t .

Нагрузки на конструкцию принимают как для расчета при нормальных температурах, если есть вероятность их действия при пожаре.

Как показало проведенное исследование, применение мощного аппарата метода конечных элементов в линейной постановке не позволяет произвести оценку предельного состояния из-за отсутствия критериев его появления. Необходим учет физической нелинейности материалов.

ПК Лира дает возможность проводить численное моделирование нелинейных нагружений, в результате которого выявляется полная картина разрушения для каждого элемента. Для нелинейного расчета создание конечноэлементной расчетной схемы может осуществляться по двум вариантам.

Первый, наиболее простой, предполагает применение физически нелинейных универсальных стержневых конечных элементов КЭ210 для колонн и физически нелинейных универсальных прямоугольных КЭ241 оболочки (и/или треугольных КЭ242 оболочки) для перекрытия.

Второй вариант более сложный, но более точный, основан на использовании физически нелинейных пространственных конечных элементов, например, физически нелинейных универсальных пространственных восьмиугольных изопараметрических КЭ236.

Расчет температурных усилий в конструкциях с использованием программных комплексов проводится при условии линейного распределения температуры по сечению элементов и задании для КЭ стержневых элементов температуры на верхней t_1 и нижней t_2 поверхности, для КЭ пластин, плит, оболочек – средней температуры $T_1 = (t_1 + t_2) / 2$ и температурного перепада $T_2 = t_1 - t_2$. При

нелинейном распределении температуры в сечении элемента возникают собственные температурные напряжения, которые влияют на общие температурные деформации плоского сечения. Потому эквивалентные температуры t_1 и t_2 необходимо определять с учетом этих напряжений, т.е. определять эквивалентные температуры, соответствующие температурной кривизне при возникновении собственных температурных напряжений. Из этой линейной аппроксимации определяются граничные эквивалентные температуры t_1 и t_2 . По реальным температурам назначаются свойства материалов, диаграмм « $\sigma - \epsilon$ » бетона и арматуры, по эквивалентным температурам определяются температурные усилия, напряжения, температурные деформации.

Погрешность применения конечных элементов стержневого и оболочечного типа возникает в связи с тем, что даже с учетом физической нелинейности в них нельзя смоделировать различный нагрев по сечению.

Для второго варианта при использовании физически нелинейных пространственных конечных элементов определение эквивалентной температуры не требуется. Плита перекрытия по высоте набирается из достаточного количества КЭ, в каждом из которых по результатам решения теплотехнической задачи задается постоянная температура либо температурный перепад. Эти данные служат одновременно для назначения прочностных и деформационных характеристик материалов и для определения температурных напряжений, усилий, деформаций.

Для проведения упругих и неупругих расчетов в программных комплексах требуются также значения модулей упругости сжатого $E_{c,\theta}$ бетона, деформаций $\epsilon_{c1,\theta}$, соответствующих прочности на сжатие $f_{c,\theta}$, предельных деформаций $\epsilon_{cu,\theta}$, $\epsilon_{tcu,\theta}$ и предельных напряжений $\sigma_{cu,\theta}$ и $\sigma_{tcu,\theta}$.

Процедура расчета содержит задание в каждом конечном элементе реальной или эквивалентной температуры, модулей упругости и расчетных сопротивлений бетона и арматуры, соответствующих их реальным температурам, определение жесткостей элементов путем задания закона нелинейного деформирования и при наличии арматуры в элементе ее процента вдоль всех осей, моделирование нелинейных загрузжений, состоящее в формировании их последовательности.

Характеристики нелинейности в ПК Лира для основного материала – бетона принимаются по заданной экспоненциальной зависимости с учетом влияния температуры нагрева путем введения понижающих коэффициентов условия работы на модуль упругости, прочность, предельные относительные деформации бетона. Для армирующего материала выбирается также зависимость нелинейности с учетом влияния температуры нагрева путем введения понижающих коэффициентов условия работы на модуль упругости, прочность, предельные относительные деформации арматуры. При арматуре стержневого типа (физический эквивалент сетки в процентах армирования) с указанием двух слоев задается процент армирования сетки по оси Y, по оси X и привязка стержней к средней поверхности Z для плиты и необходимого количества стержней для колонн.

Моделирование нелинейных загрузжений производится путем формирования последовательности загрузжений, например 1-го (собственный вес и постоянной нагрузки на секцию плиты), 2-го (временной нагрузки), и 3-го (температурных воздействий на секцию плиты и колонн) с выбором простого шагового метода расчета, при числе максимальных итераций 300, 50 равномерных шагов расчета, учета предистории предыдущих загрузжений и вывода на печать перемещений и усилий после каждого шага.

Разрушение конструкций может не произойти, о чем свидетельствует реализация всего количества заданных, например, 50 шагов, т.е. выполняется условие (1) – огнестойкость достаточна. В противном случае расчет останавливается на определенном, например, на 39 шаге третьего локального нагружения. При этом фиксируется для первого варианта расчета средняя температура плиты, равная T_1 , и температурный перепад T_2 , из которых легко определить температуры t_1 и t_2 на противоположных гранях плиты. Из анализа семейства кривых, определяющих нестационарное температурное поле в плите заданной толщины, определяется время, соответствующее этим температурам. Для второго варианта расчета фиксируются температуры в объемных элементах, по которым определяется время наступления предельного состояния.

При несоблюдении условия (1) после разработки мероприятий по повышению

огнестойкости конструкций расчет повторяется. ПК Лира позволяет проследить характер разрушений конечных элементов, причины разрушений, оставшийся ресурс каждого из них, показать характер трещинообразования и направление трещин.

Разработанная методика расчета несущей способности конструкций и рабочих нагрузок в условиях пожара позволяет прогнозировать изменение состояния зданий, разработать сценарии опасных ситуаций с учетом различных комбинаций нагрева, разработать предложения по обеспечению необходимой огнестойкости здания.

Примеры расчета плиты по различным методам. В работе [8] была рассчитана на огнестойкость по упрощенным методам полоса свободно опертой железобетонной плиты сплошного сечения шириной 1000 мм, длиной 5000 мм, толщиной 200 мм (рис. 1).

Расчетная схема, нагрузки и усилия

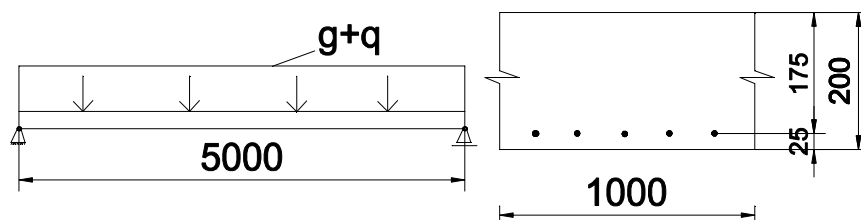


Рис. 1. Расчетная схема плиты

Исходные данные

Бетон класса C20 / 25 ($f_{ck} = 20$ МПа, $\gamma_c = 1,5$), защитный слой $s = 20$ мм):

- продольное армирование: $\varnothing 10 / 15$ ($A_s = 5,24$ см²), прочность $f_{yk} = 500$ МПа, $\gamma_s = 1,15$, горячекатаная, класс N, расстояние до оси арматуры $a = 25$ мм;
- нормативный предел огнестойкости 90 минут (R90), нагрев плиты снизу;
- нагрузка: $g_k = 6,0$ кН/м² (включая нагрузки от изоляционных, выравнивающих и отделочных слоев);

$q_k = 3,0$ кН/м² (категория C, $\psi_1 = 0,7$);

$(G + q)_d = 12,6$ кН/м² (расчетная нагрузка);

$(G + q)_{d, fi} = 8,1$ кН/м² (нагрузка при пожаре);

• усилия: $M_{Ed} = 39,4$ кНм (расчетное усилие);

$M_{Ed, fi} = 25,3$ кНм (усилие при пожаре).

Проверка

Проверка постоянной и временной расчетных ситуаций по предельным состояниям первой группы

- результаты подбора арматуры: $A_{s, req} = A_{s, prev} = 5,24 \text{ см}^2$.

Поперечное армирование не обязательно.

Проверка огнестойкости по табл. 5.8 EN [3].

Толщина плиты $h_{s, prev} = 200 \text{ мм} > h_{s, req} = 100 \text{ мм}$. Требования к огнестойкости обеспечено.

Расстояние до оси арматуры $a_{prev} = 25 \text{ мм} < a_{req} = 30 \text{ мм}$. Требования к огнестойкости не обеспечено.

Класс огнестойкости R90 не подтвержден табличными данными.

Проверка огнестойкости зональным методом по ДСТУ-Н EN 1992-1-2 [9,10]

- температура арматуры: $\theta \approx 560^\circ\text{C}$ (для $a = 25 \text{ мм}$, рис. А.2 ДСТУ [9]);

- снижение прочности стали: $k_s \approx 0,60$ (для $\theta = 560^\circ\text{C}$, $\varepsilon_{s, fi} \geq 2\%$ и кривая 1 для горячекатаной арматуры – рис. 4.2,а) [3];

- определение распределения напряжений: согласно ДСТУ [9] для классов бетона до C50/60 принимают следующие значения: $\lambda = 0,8$, $\eta = 1,0$, $\varepsilon_{cu3} = 0,35 \%$;

- усилия в арматуре: $F_{sd, fi} = A_s \cdot k_s \cdot f_{yk} = 5,24 \cdot 0,60 \cdot 50 / 1,15 = 136,7 \text{ кН}$;

- эпюра напряжений: $F_{cd, fi} = b \cdot \lambda \cdot x \cdot \eta \cdot f_{ck} = F_{sd, fi}$;

$\lambda \cdot x = 136,7 / (100 \cdot 2,0 / 1,5) = 1,025 \text{ см}$;

$x = 1,025 \text{ см} / 0,8 \approx 1,28 \text{ см}$;

$z = 20 - 2,5 - 1,025 / 2 = 17 \text{ см}$;

- определение деформаций: $\varepsilon_{s, fi} / (d - x) = \varepsilon_{cu3} / x$

$\varepsilon_{s, fi} = 0,35\% \cdot 16,22 \text{ см} / 1,28 \text{ см} = 4,43\%$;

- ограничение деформаций: $2,0\% < \varepsilon_{s, fi} = 5,8\% < \varepsilon_{su, \theta} = 20\%$.

Условия обеспечены.

- принятый момент: $M_{Rd, fi} = F_{cd, fi} \cdot z = 136,7 \cdot 0,17 = 23,24 \text{ кНм}$

$M_{Rd, fi} = 23,24 \text{ кНм} < M_{Ed, fi} = 25,3 \text{ кНм}$. Требования к огнестойкости не обеспечено.

Класс огнестойкости R90 не обеспечен.

Примечание 1. Если $\varepsilon_{s, fi} < 2,0\%$, то применяют кривую 3 (рис. 4.2,а) [3].

Примечание 2. Поскольку сжатая зона не подвергается огневому воздействию, определять ширину поврежденной зоны a_z не нужно.

Примечание 3. Для обычных изгибаемых конструкций с минимальными размерами проверка на действие поперечной силы не требуется.

Расчетная схема усилий в сечении плиты приведена на рис. 2.

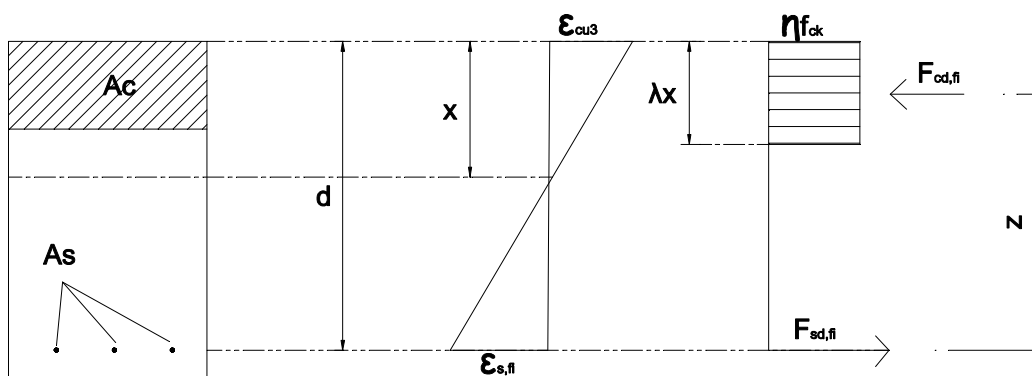


Рис. 2. Расчетная схема усилий в сечении плиты

Расчет огнестойкости плиты уточненным методом. Расчет проводится по признаку потери несущей способности (R) для второго варианта разработанного метода, основанного на использовании физически нелинейных пространственных

конечных элементов в программном комплексе ПК ЛИРА 9.6 R9 [6]. Расчетная схема плиты собрана из 625 физически нелинейных параллелепипедов КЭ231 размерами 0,2x0,2x0,04м и состоит из пяти слоев по толщине (рис. 3).

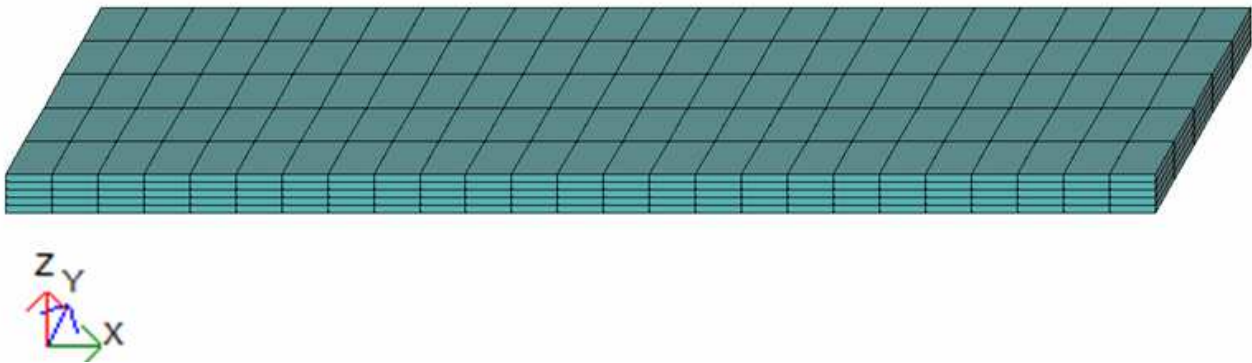


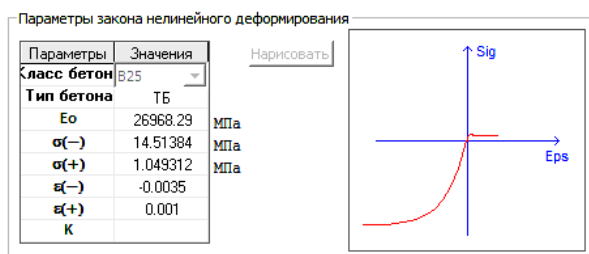
Рис. 3 Расчетная схема плиты

Задание связей. Для плиты на двух опорах отмечены нижние левые (№ 1, 7, 13, 19, 25, 31,) и нижние правые (№ 901, 907, 913, 919, 925, 931) узлы на торцах, на которые наложен запрет перемещений по оси Z и на узел №1 дополнительно запрет по осям X и Y.

Задание жесткостей. Отмечены все элементы второго снизу слоя, в котором размещена арматура, присвоен тип жесткости « 2^x.3D», назначены значения $\nu = 0.2$, $R_0 = 0,025 \text{ МН/м}^3$ и параметры нелинейности бетона и арматуры.

Для основного материала (бетона) принят закон нелинейного деформирования 31 – экспоненциальный (рис. 4,а), для армирующего материала – закон нелинейного деформирования 11 – экспоненциальный (рис. 4,б). Параметры арматуры показаны на рис. 5.

Для остальных четырех слоев присвоен тип жесткости «3^x.3D», назначены значения $\nu = 0.2$, $R_0 = 0,025 \text{ МН/м}^3$, параметры нелинейности бетона и закон нелинейного деформирования 31 – экспоненциальный (рис. 4,а).



а



б

Рис. 4. Параметры нелинейного деформирования бетона и арматуры

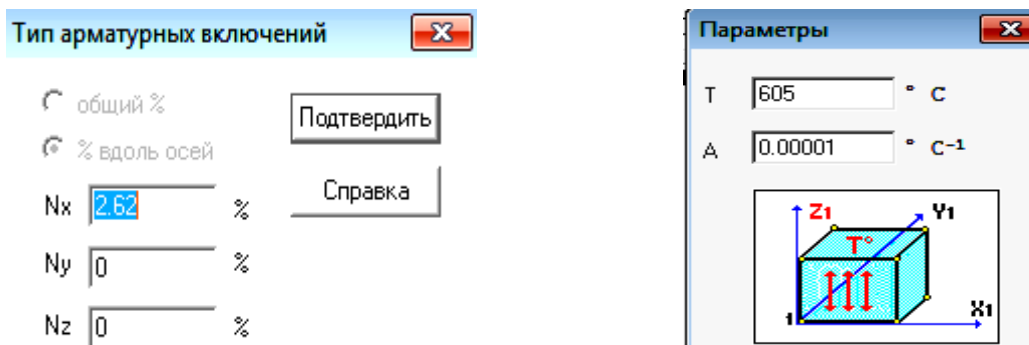


Рис. 5. Параметры арматуры и задание температуры

Задание нагрузок. Загружение 1 – собственный вес. Выделение всех элементов – добавление собственного веса.

Загружение 2 – нагружение во время пожара ($G + q$) $d, fi = 8,1 \text{ кН / м}^2$ (см. исходные данные). Выделение всех элементов и узлов пятого (верхнего) слоя и на грань №6 задание нагрузки $8,1 \text{ кН / м}^2$.

Загружение 3 – температура. Поочередно выделяются слои, в каждый из которых назначаются температуры центров по высоте слоев, полученных по диаграммам распределения температуры в приложении А [3, 11] для заданного

нормативного предела огнестойкости 90 минут (R90). Для первого снизу слоя $605 \text{ }^\circ\text{C}$, для второго $260 \text{ }^\circ\text{C}$, для третьего $105 \text{ }^\circ\text{C}$, для четвертого $70 \text{ }^\circ\text{C}$ и для пятого $45 \text{ }^\circ\text{C}$. Направление по местной оси Z.

Моделирование нелинейных нагружений. В таблице моделирования нелинейных нагружений задается номер нагружения, метод расчета – простой шаговый, количество шагов (для первого нагружения 10, для второго и третьего – 50), минимальное число итераций 300, печать – перемещения и усилия после каждого шага (рис. 6).

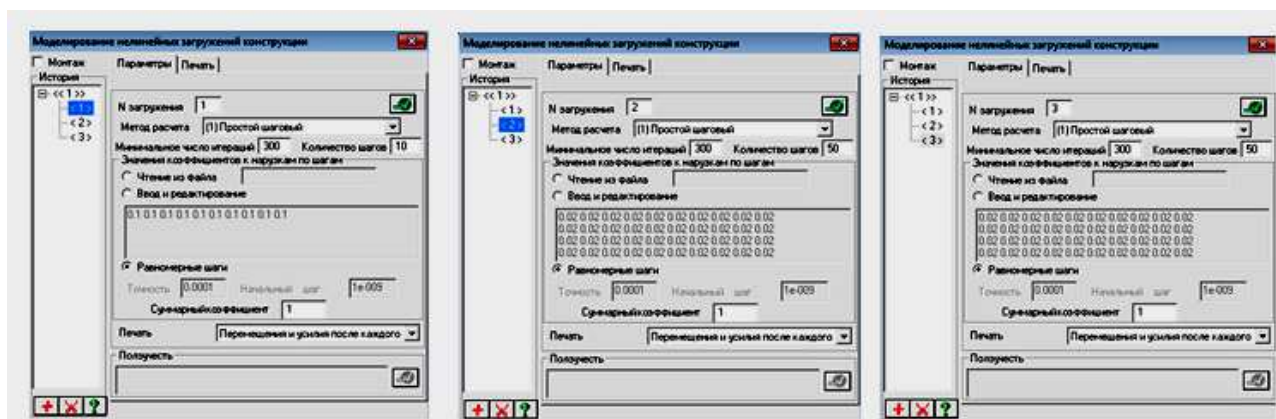


Рис. 6. Таблицы моделирования нелинейных нагружений плиты

Результаты расчета. Первые два локальных нагружения не привели к разрушению. Результаты моделирования для локального нагружения 3 выведены в скриншотах (картинах разрушения), показанных на рис. 7-10. На 15 шаге из 50

загружений появились разрушения в виде трещин (рис. 7), на 18 шаге к ним добавились разрушения от растяжения (рис. 8), на 42 шаге возникло разрушение от сжатия (рис. 9). Такая картина осталась до конца нагружений (рис. 10).

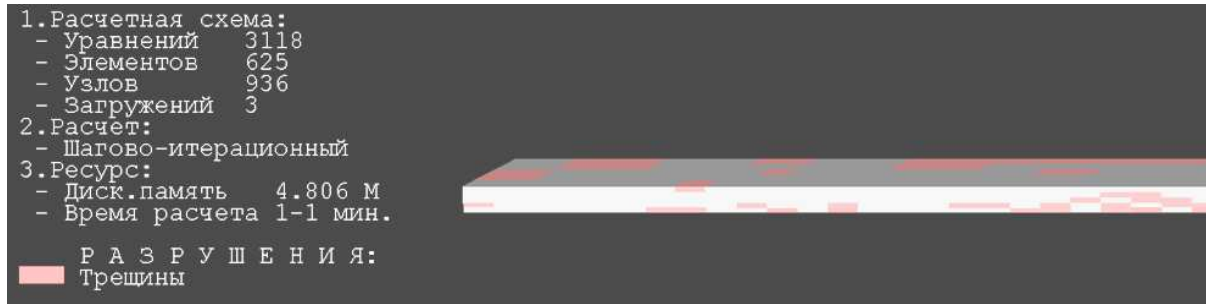


Рис. 7. Картина разрушения. Локальное загрузение 3, шаг 15

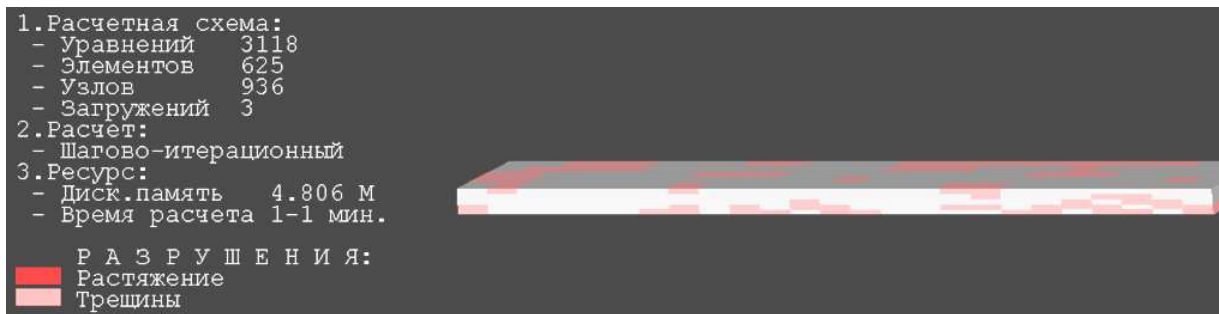


Рис. 8. Картина разрушения. Локальное загрузение 3, шаг 18

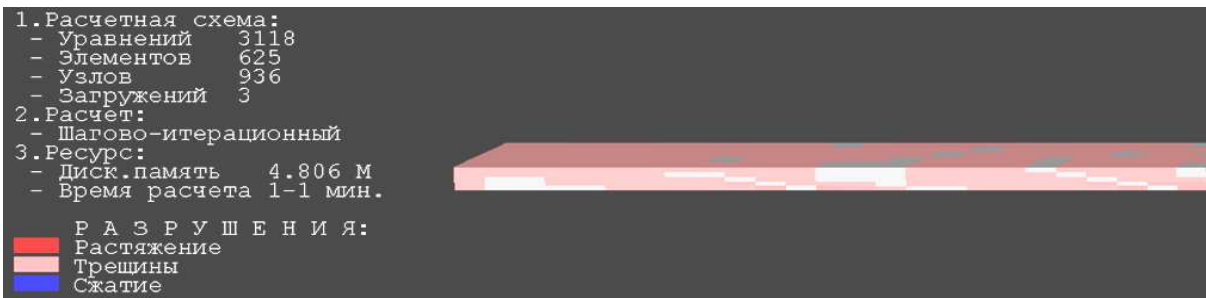


Рис. 9. Картина разрушения. Локальное загрузение 3, шаг 42

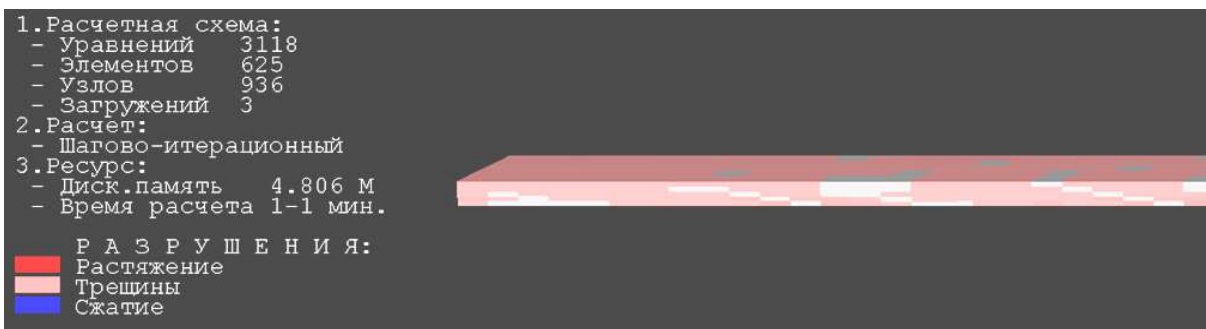


Рис. 10. Картина разрушения. Локальное загрузение 3, шаг 49

Распечатка таблицы состояния локального загрузения 3 возникли только материалов показала, что до шага 11 трещины, за ними последовало 0,5 %

разрушения основного материала по 1-й главной площадке при растяжении. На 15 шаге процент разрушения составил 3,8 %, на 42 шаге зафиксировано 0,2 % разрушение от сжатия, 16,5 % по 1-й главной площадке при растяжении, 0,2 % по 1-й и 2-й главной площадке при растяжении. Остановки расчета не произошло, – на 50 шаге было 65,0 % основного материала с трещинами, 21,1 % разрушения по 1-й главной площадке, 1 % по 1-й и 2-й главной площадке, 1 % – по 3-й главной площадке при сжатии. Разрушение арматуры не зафиксировано.

Класс огнестойкости R90 обеспечен.

Выводы из исследования и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении. Проведенные исследования показывают разную степень достоверности результатов расчета огнестойкости.

Наибольшей достоверностью обладает предложенный метод, основанный на использовании компьютерных технологий, нелинейных методов, базирующийся на основных принципах и допущениях теории теплопроводности, определенных принципах и допущениях строительной механики, учитывающий изменение механических свойств материалов от температуры.

Список использованных источников

1. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі [Текст]: ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 (EN 1991-1-2:2002, IDT).
2. Designers' Guide to EN 1992-1-1 and EN 1992-1-2. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. General Rules and Rules for Buildings and Structural Fire Design. A.W. Beeby and R.S. Narayanan. 0 7277 3105 X. Published 2005.
3. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість [Текст] : ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 (EN 1992-1-2:2004, IDT).
4. Бартлеми, Б. Огнестойкость строительных конструкций [Текст] / Б. Бартлеми, Ж. Крюпа; пер. с франц. М. В. Предтеченского; под ред. В. В. Жукова. – М.: Стройиздат, 1985. – 216 с.
5. Fire resistance assessment of concrete structures / Fabienne ROBERT, Luc DAVENNE, Iuliana STOIAN // Workshop 'Structural Fire Design of Buildings according to the Eurocodes' – Brussels, 27-28 November 2012.
6. Фомин, С. Л. Методика расчета огнестойкости монолитных зданий с безригельными каркасами [Текст] / С. Л. Фомин // Міжвідомчий наук.-техн. зб. наук. праць (будівництво) / Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку та будівництва України. Вип.74: в 2-х кн.: Книга 1. – К.: ДП НДІБК, 2011. – С. 228-239.
7. Пожежна безпека об'єктів будівництва [Текст] : ДБН В.1.1-7-2002. – К.: Держбуд України, 2003.
8. Nachweis der Feuerwiderstandsdauer einer Hochbaudecke nach DIN EN 1992-1-2 http://www.lga.de/lga/de/download/statik_tipp_1101.pdf
9. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість [Текст] : ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 (EN 1992-1-2:2004, IDT).
10. Kodur, V.K.R., Agrawal, A. An approach for evaluating residual capacity of reinforced concrete beams exposed to fire Engineering Structures. 2016.
11. Fib Bulletin 46: Fire design of concrete structures – structural behavior and assessment, 2008.
12. Pakala, P., Kodur, V. Effect of concrete slab on the behavior of fire exposed subframe assemblies with bolted double angle connections . Engineering Structures. 2016.

13. Shakya, A.M., Kodur, V.K.R. Response of precast prestressed concrete hollowcore slabs under fire. *Engineering Structures*. 2015.

14. Kodur, V.K., Agrawal, A. Critical Factors Governing the Residual Response of Reinforced Concrete Beams Exposed to Fire. *Fire Technology* Article in Press. 2015.

Фомін Станіслав Леонідович, д-р техн. наук, професор кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (057) 700-01-63. E-mail: Sfomin@ukr.net.

Плахотникова Ірина Анатоліївна канд. техн. наук, доцент кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (057) 700-01-63. E-mail: ira5657@gmail.com.

Парафенко Ганна Олександрівна, студентка Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (057) 700-01-63. E-mail: anna.parafenko@gmail.com.

Fomin Stanislav Leonidovich. Dr. Sc. , professor of concrete and masonry structures Kharkiv National University of Construction and Architecture. Tel.: (057) 700-01-63. E-mail: Sfomin@ukr.net.

Plahotnikova Irina A. candidate. tehn. Associate Professor, Department of concrete and masonry structures of Kharkiv National University of Construction and Architecture. Tel. : (057) 700-01-63. E-mail: ira5657@gmail.com.

Parafenko Anna A. student of Kharkov National University of Construction and Architecture. Tel.: (057) 700-01-63. E-mail: anna.parafenko@gmail.com.

Стаття прийнята 23.05.2016 р.