ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТОЙКОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПРИ КОМБИНИРОВАННЫХ ОСОБЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ С УЧАСТИЕМ ПОЖАРА – БАЗОВЫЙ ЭЛЕМЕНТ СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Теличенко Валерий Иванович
Ректор МГСУ, заведующий кафедрой строительства тепловых и атомных электростанций, академик РААСН, доктор технических наук, профессор

Ройтман Владимир Миронович
Профессор кафедры технического регулирования Института строительства и архитектуры МГСУ, доктор технических наук

ВВЕДЕНИЕ

Проблема обеспечения безопасности зданий и сооружений с учетом террористической угрозы является в нашей стране весьма актуальной, так как строительный комплекс является одним из самых уязвимых объектов для такого рода воздействий.

В МГСУ уделяется серьезное внимание решению этой проблемы. Причем, изучение этой проблемы и разработка методов и средств для ее решения являются в настоящее время составной частью современного инновационного развития МГСУ в научном, прикладном и образовательном аспектах [1].

Трагические события 11 сентября 2001 года, связанные с атакой террористов высотных зданий Всемирного торгового центра (ВТЦ) и здания Пентагона, поставили перед человечеством ряд политических, социальных, технических проблем [1-5].

Среди технических проблем одно из основных мест заняла проблема защиты уникальных объектов от прогрессирующего обрушения при чрезвычайных ситуациях, связанных с комбинированными особыми воздействиями, типа « удар-взрыв-пожар».

В данной работе рассматриваются результаты исследований, проводимых в МГСУ совместно с Академией ГПС МЧС России, в новом научном направлении «Оценка стойкости объектов при комбинированных особых воздействиях с участием пожара [1-5].

Время сопротивления объекта опасным факторам ЧС с участием пожара – это главный показатель, обеспечивающий комплексную безопасность объектов [6].

Обращается особое внимание на то, что обеспечение стойкости зданий и сооружений при комбинированных особых воздействиях с участием пожара является базовым элементом системы обеспечения комплексной безопасности объектов, так как фактически обеспечивает, так называемую **первоочередную безопасность объекта**.

1. Понятие о комбинированных особых воздействиях (СНЕ) с участием пожара

Комбинации рабочих (эксплуатационных) нагрузок и «форс-мажорных» дополнительных нагрузок на строительные объекты во время чрезвычайных ситуаций предлагается называть «комбинированными особыми воздействиями». В качестве аббревиатуры этого понятия используется английский вариант названия «combined hazardous effect» – «СНЕ» [2-5].

В работах [2-4] были сформулированы определения для следующих понятий:

Особое воздействие на объект – исключительное воздействие, резко отличающееся от обычных условий существования объекта.

Основные особые воздействия техногенного характера на строительные объекты: удар (I), взрыв (E), пожар (F), нагрузка (S) и т.д.

Комбинированное особое воздействие (СНЕ) – чрезвычайная ситуация, связанная с возникновением и развитием нескольких видов особых воздействий на объект в различных сочетаниях и последовательностях.

Комбинированные особые воздействия с участием пожара – чрезвычайные ситуации, связанные с возникновением и развитием нескольких видов особых воздействий на объект в различных сочетаниях и последовательностях, причем одним из таких воздействий является пожар.

Например:

- при рассмотрении угрозы прогрессирующего обрушения здания, при столкновении с ним самолета необходимо рассматривать комбинированное особое воздействие типа «удар-взрыв-пожар» («combined hazardous effect of the impact-explosion-fire type» [2]) (СНЕ «IEF»);
- при аварии на Чернобыльской АЭС имели место СНЕ типа «взрыв-удар-пожар» и т.д.

2. ОСОБЫЙ ХАРАКТЕР ОПАСНОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ ОСОБЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ С УЧАСТИЕМ ПОЖАРА НА ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

2.1. Террористическая атака башен Всемирного торгового центра в Нью-Йорке во время событий 11 сентября 2001 года

Всемирный торговый центр (ВТЦ) в Нью-Йорке представлял собой комплекс из семи зданий в южной части Манхеттена (рис.1).

Архитектурной доминантой комплекса ВТЦ являлись две 110-этажные башни (см.рис.1), против которых и были направлены атаки террористов 11 сентября 2001 г. В этих башнях в качестве арендаторов помещений размещались около полутысячи фирм из разных стран мира [2-5].

Рис.1. Общий вид башен Всемирного торгового центра в Нью-Йорке

Башни ВТЦ были похожими (см. рис.1), но не идентичными. Северная башня (ВТЦ-1) была на 6 футов выше, чем ВТЦ-2 и, кроме того, на ней была установлена 360 футовая антенна для теле- и радио трансляций. Во внутренних стволах башен находились 99 лифтов, 3 лестницы и 16 эскалаторов. Высота башен составляла 415 и 417 м. В плане каждая башня имела форму квадрата с размерами 63,5×63,5 м [2-5].

Конструктивная схема башен ВТЦ включала две связанных между собой пространственных конструктивных системы – наружной оболочки и внутреннего ствола.

Наружные оболочки башен ВТЦ представляли собой жесткие пространственные решетки, образованные металлическими колоннами коробчатого сечения 35,6×34,3 см и стальными обвязочными балками. Эти обвязочные балки скрепляли колонны наружной оболочки на уровне подоконников по периметру каждого этажа. В целом, наружные оболочки обеих башен образовывали жесткие “трубы”, зафиксированные на фундаментах. Центральный ствол (ядро) башен ВТЦ был образован 47 металлическими колоннами различной формы сечения [2-5].

Конструкция перекрытий представляла собой пространственную систему из металлических балок-ферм, связанных вспомогательными балками. Вспомогательные балки поддерживали профилированный на-

стил, на который была уложена плита из легкого бетона толщиной 100 мм.

Огнестойкость металлических конструкций башен обеспечивалась облицовкой вермикулитовыми плитами толщиной примерно 3,0-4,5 см, напылением эффективных огнезащитных составов, а также устройством на нижней поверхности перекрытия подвесных потолков с регламентированной огнестойкостью. **С учетом огнезащиты несущие металлические конструкции этих башен имели пределы огнестойкости по потере несущей способности 180 минут (R180)** [5].

11 сентября 2001 г. самолеты (Боинг-767), угнанные террористами, таранили башни ВТЦ (рис.2). В результате этой атаки было серьезно повреждено или полностью разрушено 10 зданий, погибло 2792 человека.

Необходимо обратить особое внимание на то, что обе высотные башни ВТЦ после чудовищного удара 180-тонных самолетов, летящих на скорости около 800 км/ч, несмотря на разрушение нескольких десятков несущих конструкций (см. рис.2), устояли.

Прогрессирующего обрушения высотных башен после удара самолетов не произошло. Не произошло потому, что уцелевшие после удара несущие конструкции башен имели достаточный запас прочности, который позволил им воспринять и выдержать дополнительные нагрузки от разрушенных конструкций [2-5].

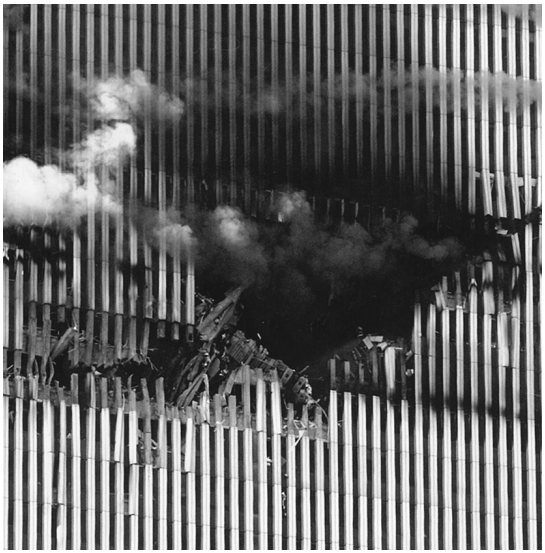

Рис.2. Последствия удара самолета в северный фасад башни ВТЦ-1 (Северная башня) 11 сентября 2001 год

Пробив наружную оболочку башен, обломки самолетов проникли внутрь зданий ВТЦ. В зону удара, в помещения башен, попало авиатопливо из разрушенных топливных баков самолетов. Как следствие этого, в зоне удара самолета, внутри башен произошли взрывы смеси распыленного и испарившегося авиатоплива с воздухом (рис.3). Это привело к дополнительному разрушению и повреждению ряда ограждающих и несущих конструкций башен.

Благодаря вскрытию остекления, пробоинам в наружной оболочке башен после удара самолета, которые сыграли роль взрывозащиты зданий (легкосбрасываемых конструкций и открытых проемов), большое количество взрывоопасной смеси топлива с воздухом было выброшено и сгорело в окружающей среде в виде гигантских «огненных шаров» (см. рис.3). Это снизило избыточное давление взрыва внутри здания до уровня, безопасного для основных несущих конструкций здания, и прогрессирующего обрушения башен опять не произошло.

Учитывая наличие значительного количества горючих материалов в помещениях офисов, размещенных в башнях ВТЦ (пожарная нагрузка – 40 кг/м^2 в эквиваленте древесины [2-4], в зоне удара самолета и последующего взрыва внутри зданий ВТЦ возникают пожары (см. рис.3) – особое воздействие на конструкции, связанное с развитием в очаге пожара высоких температур.

Рис.3. Комбинированные особые воздействия типа «удар-взрыв-пожар» на башни ВТЦ (Нью-Йорк) во время событий 11 сентября 2001 года

Несмотря на это, башни ВТЦ продолжали сопротивляться последовательному воздействию удара, взрыва и пожара в течение нескольких десятков минут (см. рис.3). Башня ВТЦ-2 сопротивлялась особым комбинированным воздействиям 56 мин, а ВТЦ-1 – 1 ч 43 мин, и только после началось прогрессирующее обрушение башен ВТЦ в целом (рис.4).

Рис.4. Начало прогрессирующего обрушения башни ВТЦ-2

Именно эта стойкость зданий ВТЦ и позволила эвакуироваться или спастись десяткам тысяч людей, находившихся в атакованных зданиях или в непосредственной близости от них [1-5].

Однако необходимо отметить, что **потеря устойчивости этих башен во время событий 11 сентября произошла гораздо быстрее, чем это регламентировалось нормами по обеспечению огнестойкости этих башен**.

Имея значение фактических пределов огнестойкости основных конструкций с учетом огнезащиты, равное **180 минутам** по потере несущей способности **(R180),** во время событий 11 сентября 2001 года башни ВТЦ утратили свою устойчивость гораздо быстрее: напоминаем, башня ВТЦ-2 – через **56 минут**, а башня ВТЦ-1 – через **103 минуты** после начала атаки террористов**.**

2.2. События 11 сентября 2001 года в здании Пентагона

Здание Пентагона является одним их самых больших офисных зданий в мире. Площадь этажа 613 000 м^2. Здание пятиэтажное, имеет 5 фасадов. Внутри здание состоит из 5 концентрических колец (рис.5).

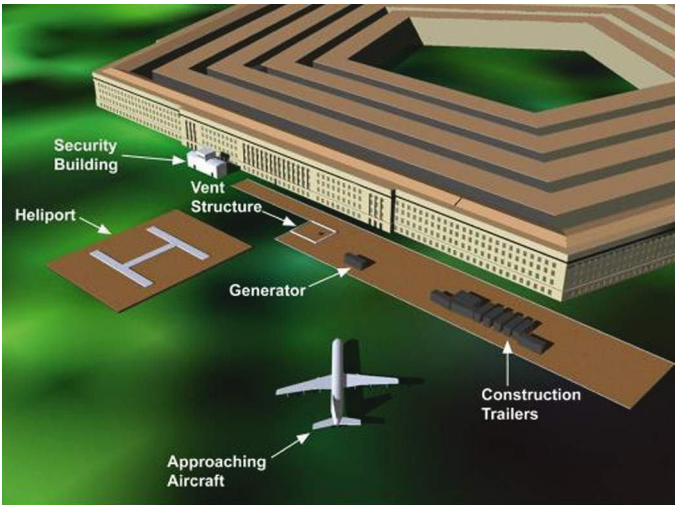

Рис.5. Направление движения самолета перед столкновением
со зданием Пентагона

Здание построено из монолитных железобетонных конструкций. Бетон – обычный тяжёлый. Перекрытия состоят из плит, ригелей и системы балок, опирающихся на колонны. Большая часть колонн была квадратного сечения. Размеры сечения изменяются от 0,53×0,53 м на первом этаже до 0,35×0,35 м на пятом этаже. Почти все колонны, имеют спиральное армирование по вертикальной рабочей арматуре.

Предел огнестойкости такого рода колонн составляет более 180 минут (R180)/ по потере несущей способности [2-4].

Столкновение самолета со зданием Пентагона во время событий 11 сентября 2001 года произошло в зоне 1-го этажа наружного фасада здания и привело к возникновению СНЕ «IEF» (см. рис.5).

Согласно отчётам очевидцев и другой информации [2-4], Боинг 757 приблизился к зданию Пентагона с юго-запада. Когда он был на расстоянии приблизительно 100 м от западной стены здания Пентагона, он летел лишь в нескольких футах от земли.

Первое особое воздействие «удар» («I») – разрушило и повредило часть конструктивных элементов 1-го этажа наружного кольца здания Пентагона. Обломки самолета проникли внутрь здания. Из разрушенных баков самолета, размещенных в его крыльях, топливо было выброшено в зону удара внутри здания.

Это привело к возникновению второго особого воздействия на конструкции здания – взрыва (E) смеси топлива с воздухом. Взрывом были разрушены и повреждены еще часть конструктивных элементов здания.

После удара и взрыва внутри здания в зоне поражения возникает и развивается третье особое воздействие – пожар (F). Огонь охватывает часть уцелевших **ключевых** конструктивных элементов.

Здание Пентагона в первые минуты CHE IEF, несмотря на значительные повреждения конструкций в трех первых кольцах здания, в целом сохранило свою устойчивость (рис.6).

Рис. 6. Вид фасада здания Пентагона в первые минуты «CHE IEF» 11 сентября 2001 года

Рис.7. Прогрессирующее обрушение наружного кольца здания Пентагона в зоне комбинированных особых воздействий типа «удар-взрыв-пожар» во время событий 11 сентября 2001 года

Однако, через 19 минут после начала комбинированного особого воздействия типа «удар-взрыв-пожар» произошло прогрессирующее обрушение конструкций наружного кольца здания Пентагона в зоне «СНЕ IEF» (рис.7).

Таким образом, не смотря на то, что предел огнестойкости ключевых элементов здания Пентагона (несущих колонн) превышал **180 минут** по потере несущей способности, наружное кольцо здания Пентагона в зоне ЧС утратило свою устойчивость через **19 минут** после начала СНЕ с участием пожара.

2.3. Опасный эффект, приводящий к преждевременной потере устойчивости зданий и сооружений при комбинированных особых воздействиях с участием пожара

Рассмотренные выше прецеденты свидетельствуют о том, что во время событий 11 сентября 2001 года имели место некие, ранее не учитываемые, опасные эффекты, наличие которых и приводило к преждевременной потере устойчивости зданий.

Очевидно, что возникновение этих ранее не учитываемых опасных эффектов было связано с особенностями комбинированных особых воздействий с участием пожара, имевших место во время событий 11 сентября 2001 года.

Результаты исследований инженерных аспектов событий 11 сентября 2001 года [1-5] дают представление о том, что при комбинированных особых воздействиях с участием пожара типа «удар-взрыв-пожар» (СНЕ «IEF») имеют место следующие характерные особенности:

а) Возникает несколько групп конструкций, имеющих различную степень повреждения.

б) Вследствие различной степени повреждения, эти группы конструкций будут утрачивать свою несущую способность не одновременно, а в различные моменты времени развития ЧС.

в) В результате, на различных стадиях развития ЧС нагрузка на строительные конструкции будет увеличиваться, так как по мере последовательного выхода из строя более поврежденных групп несущих конструкций нагрузка на оставшиеся конструкции будет возрастать.

г) Повышение нагрузки на уцелевшие строительные конструкции на соответствующих стадиях развития СНЕ с участием пожара приводит к снижению критической температуры нагрева конструкций и более быстрому их выходу из строя.

С учетом этих особенностей, в условиях комбинированных особых воздействий с участием пожара, в результате перераспределения нагрузок на конструкции на различных стадиях ЧС, возникает **эффект уменьшения критической температуры нагрева материалов конструкций [2-4].**

Критической температурой нагрева материала конструкции при пожаре называется такая температура нагрева материала конструкции, при которой материал утрачивает способность сопротивляться воздействию пожара.

Особая опасность для зданий этого эффекта определяется очевидным соображением о том, что, чем больше механическая нагрузка на конструкцию, тем меньше критическая температура прогрева конструкций и тем быстрее они утрачивают свою несущую способность в условиях СНЕ с участием пожара, тем быстрее наступает потеря устойчивости (прогрессирующее обрушение) здания в целом.

Например, критическая температура прогрева металлических колонн башен ВТЦ при воздействии только пожара T^{cr} составляла около 500ºС.

Как показали исследования [1-5], величина критической температуры прогрева металлических колонн башен ВТЦ в условиях СНЕ с участием пожара, снижалась до 310-130ºС. Этот эффект и привел к более быстрой утрате несущей способности конструкций башен ВТЦ и преждевременному их прогрессирующему обрушению.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ И ЗДАНИЙ ПРИ ЧС С УЧАСТИЕМ ПОЖАРА

3.1. Теория огнестойкости конструкций и зданий

Особый характер опасности воздействия пожара на здания и сооружения подтверждается тем, что в международных нормах по пожарной безопасности зданий и сооружений введены специальные показатели, характеризующие способность объектов сопротивляться воздействию пожара, причем в этих показателях главной характеристикой, обеспечивающий безопасность объектов в этих условиях, является **время** сопротивления объектов воздействию пожара.

В отечественных нормах [6] показатель, характеризующий способность строительных конструкций сопротивляться воздействию пожара называется **пределом огнестойкости**, а показатель, который характеризует способность здания в целом сопротивляться воздействию пожара называется **степень огнестойкости**.

С помощью этих показателей в нормах регламентируется время, в течение которого конструкции, здания и сооружения должны сопротивляться высокотемпературному воздействию пожара.

Необходимость решения комплекса научных и инженерных задач по оценке огнестойкости зданий и сооружений, стимулировала развитие

международных исследований, результаты которых сложились в теорию огнестойкости [2-4].

Сущность расчета конструкций на огнестойкость заключается в определении момента **времени**, по истечении которого в условиях воздействия пожара конструкции утрачивают свои несущие или теплоизолирующие способности.

Огнестойкость конструкций по признаку потери несущей способности $П_ф(R)$ определяется как момент времени воздействия пожара τ, при котором несущая способность конструкции $Ф[T(\tau)]$ снизится до величины действующих на нее рабочих нагрузок $N_н$ ($M_н$).

Огнестойкость конструкции в этом случае определяется из условия:

$$\text{если } Ф\,[T(\tau)] \le M_н\,(N_н), \text{ то } \tau = П_ф(R), \qquad (1)$$

где $N_н$, $M_н$ – продольная сила и изгибающий момент от нормативной рабочей нагрузки соответственно;

$T(\tau)$ – температура нагрева.

Расчеты строительных конструкций на огнестойкость являются одной из разновидностей расчета конструкций по предельным состояниям.

Например, при расчетах строительных конструкций на огнестойкость используется показатель **коэффициент условий работы материала конструкции при пожаре** γ_T [2-5]. Этот коэффициент учитывает особенности изменения сопротивления обычных строительных материалов при их нагреве в условиях пожара.

В соответствии с этим подходом, коэффициенты условий работы материалов обычных конструкций при пожаре представляют собой зависимости между сопротивлением материалов R(T) и температурой их прогрева T.

В относительном виде эти зависимости представляются как:

$$\boldsymbol{\gamma_T} = R\,(T) / R = f(T), \qquad (2)$$

где R(T) – прочность материала при температуре T;

R – начальная прочность материала.

Зависимости типа (2) были получены для всех основных строительных материалов в результате многолетних специальных экспериментальных исследований. Эти исследования [2-4] показывают, что сопротивление обычных материалов строительных конструкций при прогреве в условиях пожара после определенной температуры нагрева начинает быстро уменьшаться.

В настоящее время эти зависимости используются в качестве справочных данных при расчетах строительных конструкций на огнестойкость.

Огнестойкость строительных конструкций в ряде случаев удобно оценивать с помощью показателя критической температуры прогрева материалов конструкций в условиях пожара.

Понятие **критической температуры** прогрева материалов конструкций является одним из базовых показателей, используемых в теории расчета строительных конструкций на огнестойкость [2-5].

При использовании этого показателя, расчет строительных конструкций на огнестойкость также включает в себя решение двух задач:

1) Прочностная задача огнестойкости – определение нормативной рабочей нагрузки на рассматриваемую конструкцию и соответствующих этой нагрузке значений коэффициентов условий работы материалов конструкции при пожаре и, далее, значений критической температуры их нагрева в этих условиях.

2) Теплофизическая задача огнестойкости – определение момента времени воздействия пожара на строительную конструкцию, при котором материал ключевых элементов конструкций прогревается до «критической температуры».

Например, при расчетах пределов огнестойкости изгибаемых железобетонных конструкций по потере несущей способности решение задачи сводится к определению времени воздействия пожара τ, в течение которого температура рабочей арматуры растянутой зоны конструкции $T_s(\tau)$ достигнет критического значения T_s^{cr}.

Тогда предел огнестойкости конструкции по признаку утраты несущей способности (R) определяется из следующего условия:

$$\text{Если } T_s(\tau) \geq T_s^{cr}, \text{ то } \tau = \Pi_ф(R), \qquad (3)$$

где $T_s(\tau)$ – температура прогрева рабочей арматуры растянутой зоны изгибаемого железобетонного элемента в момент времени τ развития пожара;

T_s^{cr} – критическая температура прогрева рабочей арматуры растянутой зоны конструкции;

$\Pi_ф(R)$ – значение предела огнестойкости конструкции по потере несущей способности.

Таким образом, особенностью теории огнестойкости строительных конструкций является то, что значение критической температуры нагрева материала конструкции при оценках пределов огнестойкости конструкций имеет фиксированное значение, соответствующее расчетному уровню нормативной рабочей нагрузки на эту конструкцию.

Возникла необходимость решения новой проблемы – обеспечения необходимого сопротивления уникальных объектов при различных комбинированных особых воздействиях (СНЕ) с участием пожара.

3.2. Разработка теории стойкости конструкций и зданий при комбинированных особых воздействиях (СНЕ) с участием пожара

Поиски решения этой проблемы выявили необходимость введения специального понятия, которое по своему физическому смыслу отражало бы способность объекта сопротивляться СНЕ с участием пожара в течение определенного времени.

Наиболее близким прототипом такого рода понятия является понятие **огнестойкость** конструкций и зданий.

Доказанная [2-4] общность методических и физических принципов, лежащих в основе понятий «долговечность», «огнестойкость», «стойкость» объектов, позволила предложить более общее понятие «стойкость объектов против прогрессирующего обрушения при СНЕ с участием пожара», которое можно применять при решении более широкого класса задач, связанных с рассмотрением различных СНЕ с участием пожара.

С учетом вышеизложенного:

Стойкость конструкции при СНЕ с участием пожара $\tau_{che,r}$ – время, в течение которого конструкция сохраняет свои несущие, ограждающие функции в условиях СНЕ с участием пожара.

Стойкость здания при СНЕ с участием пожара $D_{сне,\ г}$ – время, в течение которого здание в целом сопротивляется воздействию опасных факторов СНЕ без потери общей устойчивости и геометрической неизменяемости. Стойкость здания определяется стойкостью при СНЕ его основных конструкций.

Огнестойкость конструкции $П_ф$ – время, в течение которого конструкция сохраняет свои несущие, ограждающие функции в условиях воздействия рабочей нагрузки и высоких температур пожара.

Фактически, огнестойкость является частным случаем более общего понятия **стойкость объектов при СНЕ с участием пожара**.

Суть предлагаемого метода оценки стойкости зданий при СНЕ с участием пожара заключается в расчете изменения во времени несущей способности различных характерных групп структурных элементов объекта и нагрузок на них при заданном сценарии СНЕ с участием пожара с учетом особенностей поведения материалов конструкций в рассматриваемых условиях.

Время, в течение которого здание в целом сопротивляется воздействию опасных факторов СНЕ без потери своей общей устойчивости и геометрической неизменяемости, характеризует **стойкость здания против прогрессирующего обрушения при СНЕ** $D_{CHE,R}$.

С учетом вышеизложенного **прогрессирующее обрушение объекта – это последняя лавинообразная стадия развивающегося во времени процесса последовательного исчерпания стойкости струк-**

турных элементов объекта, что приводит к потере общей устойчивости объекта в целом.

Источники СНЕ могут иметь весьма широкий диапазон характеристик опасных воздействий. В весьма широких пределах могут также изменяться сценарии СНЕ.

В связи с этим все многообразие воздействий СНЕ на здание предлагается выражать через последствия этих воздействий на состояние ключевых конструктивных элементов здания, которые определяют его стойкость против прогрессирующего разрушения.

Ключевые конструктивные элементы здания при СНЕ – конструктивные элементы здания, участвующие и играющие определяющую роль в обеспечении общей устойчивости и геометрической неизменяемости здания в рассматриваемых условиях.

В качестве ключевых конструктивных элементов, исходя из конструктивных схем современных зданий, могут рассматриваться колонны, несущие стены, рамы и т.д.

Все ключевые конструктивные элементы рассматриваемого здания разбиваются на несколько характерных групп в зависимости от их состояния в условиях СНЕ и способности этих элементов сопротивляться СНЕ.

С учетом различной стойкости характерных групп «ключевых» конструктивных элементов при СНЕ, процесс исчерпания стойкости здания при заданном сценарии СНЕ будет происходить постадийно в результате последовательной утраты стойкости различными выделенными характерными группами ключевых конструктивных элементов.

Утрата стойкости определенной характерной группой ключевых конструктивных элементов здания на той или иной расчетной стадии СНЕ приводит к увеличению рабочих нагрузок на оставшиеся группы уцелевших ключевых конструктивных элементов. Это, в свою очередь, приводит к ухудшению условий их работы (уменьшает запас прочности конструкции, снижает критическую температуру нагрева при пожаре и т.д.) и ведет к снижению их стойкости при СНЕ.

Наличие этих процессов приводит к необходимости рассмотрения ряда расчетных стадий развития СНЕ. Каждая из выделенных расчетных стадий развития СНЕ будет соответствовать утрате стойкости при СНЕ определенной характерной группой ключевых конструктивных элементов.

Стойкость строительной конструкции при комбинированных особых воздействиях определяется временем τ_{CHE} от начала комбинированного особого воздействия (СНЕ) до момента, когда несущей способности конструкции (R_{CHE}) становится недостаточно для восприятия нагрузки (S_{CHE}), приложенной к ней на различных стадиях СНЕ.

Стойкость конструкции при СНЕ ($\tau_{CHE,r}$) определяют путем расчета изменения ее несущей способности (R_{CHE}) и приложенной к ней нагрузки

(S_{CHE}) на различных стадиях СНЕ в соответствии с рассматриваемым сценарием СНЕ «IEF».

Стойкость конструкции при СНЕ с участием пожара ($\tau_{CHE,r}$) определяется из выражения:

$$\text{Если } R_{CHE}(\tau_{CHE}) < S_{CHE}, \text{ то } \tau_{CHE} = \tau_{CHE,r}. \quad (4)$$

Здание в целом исчерпает свою стойкость против прогрессирующего разрушения ($D_{CHE,r}$) и потеряет свою устойчивость при выбранном сценарии СНЕ с участием пожара, если все характерные группы ключевых конструктивных элементов здания исчерпают свою стойкость при СНЕ (достигнут своего предельного состояния по потере несущей способности) на какой-либо из расчетных стадий СНЕ.

Время τ_{CHE}, когда это произойдет и будет определять фактическую стойкость здания против прогрессирующего обрушения ($D^{act}_{CHE,r}$) для выбранного сценария СНЕ.

Например, стойкость объекта против прогрессирующего разрушения при СНЕ с участием пожара, если в качестве ключевых конструкций рассматриваются сжатые элементы, можно определить из выражения:

$$\text{Если } \sum_{l}^{k} R_k^i(\tau^i_{CHE}) < \sum N, \text{ то } \tau^i_{CHE} = D^{act}_{CHE,r}, \quad (5)$$

где $\sum_{l}^{k} R_k^i(\tau^i_{CHE})$ – суммарная несущая способность ключевых сжатых конструктивных элементов объекта, всех характерных групп k, к концу расчетной стадии i;

τ^i_{CHE} – время комбинированного особого воздействия СНЕ, к моменту времени окончания расчетной стадии i;

$\sum N$ – суммарная сжимающая нагрузка на ключевые сжатые конструктивные элементы объекта.

Значение стойкости здания в этих условиях также может быть определено из соотношения:

$$\text{Если } \tau_{CHE} > \tau_{\substack{CHE,r \\ \text{всех "ключевых"} \\ \text{элементов}}}, \text{ то } \tau_{CHE} = D_{CHE,r}. \quad (6)$$

Здание сохранит определенную долю своей стойкости против прогрессирующего обрушения и не будет полностью разрушено при заданном сценарии СНЕ» если отдельные группы ключевых конструктивных элементов здания не исчерпают своей стойкости (не достигнут предель-

ного состояния по потере несущей способности) после рассмотрения всех расчетных стадий СНЕ. В этом случае здание сохранит свою целостность, но получит тот или иной уровень повреждений.

Возможность сохранения зданием своей целостности, при заданном сценарии СНЕ, определяется из условия:

$$\text{Если } \tau_{CHE} < \tau_{\substack{CHE,r \\ всех\ "ключевых" \\ элементов}}, \text{ то } D_{CHE,r} > \tau_{CHE}. \qquad (7)$$

Предлагаемый метод может быть использован для решения двух типов задач.

Задача I-го типа (прямая задача). Оценка стойкости здания при различных сценариях СНЕ с участием пожара.

Задача II-го типа (обратная задача). Определение допустимого числа ключевых конструкций здания, которые могут быть разрушены или повреждены при СНЕ с участием пожара, исходя из заданной (нормируемой) стойкости здания против прогрессирующего обрушения ($D^{req}_{CHE,r}$). Нормируемый уровень стойкости здания определяется исходя из допустимых уровней рисков, безопасности людей и сохранения здания.

Предлагаемые теория и методы оценки стойкости зданий при комбинированных особых воздействиях с участием пожара дают возможность любого уровня детализации исходной модели здания или сооружения и расчетного сценария развития комбинированных особых воздействий с участием пожара.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенные исследования являются составной частью современного инновационного развития МГСУ в новом научном направлении «Оценка стойкости зданий и сооружений при комбинированных особых воздействиях с участием пожара», результаты которого нашли практическое применение в научном, прикладном и образовательном аспектах [1-5].

2. Обеспечение стойкости зданий и сооружений при комбинированных особых воздействиях с участием пожара является базовым элементом системы обеспечения комплексной безопасности объектов, так как, фактически, обеспечивает, так называемую, «первоочередную безопасность» объекта.

3. Необходимо внести дополнения и уточнения в нормы, относящиеся к обеспечению комплексной безопасности объектов [7-9], которые учитывали бы особую опасность комбинированных особых воздействий с участием пожара и необходимость с учетом террористических угроз специальной оценки стойкости зданий и сооружений к этому виду ЧС.

Библиографический список

1. Теличенко В.И. Концепция законодательного обеспечения безопасности среды жизнедеятельности: Труды общего собрания РААСН, 2006. В 2 т. – СПб. Т.1. С.236-241.
2. Roytman V.V., Pasman H.J., Lukashevich I.E. The Concept of Evaluation of Building Resistance against combined hazardous Effects “Impact-Explosion-Fire” after Aircraft Crash. –Fire and Explosion Hazards: Proceedings of the Fourth International Seminar, 2003, Londonderry, NI, UK, pp.283-293.
3. Ройтман В.М. Стойкость зданий и сооружений против прогрессирующего обрушения при комбинированных особых воздействиях участием пожара // Вестник МГСУ. – М.: МГСУ, 2009. Спец. вып. №2. С.37-59.
4. Ройтман В.М. Основы пожарной безопасности высотных зданий. – М.: ИСА МГСУ, 2009. – 107 с.; ил.
5. Агафонова В.В., Родионов Г.А., Ройтман В.М. Опасный эффект, влияющий на устойчивость зданий при комбинированных особых воздействиях с участием пожара. В кн.: Строительство – формирование среды жизнедеятельности: Тезисы докл. 13-й Межд., межвуз. научн.-практич. конф. мол. ученых. – М.: МГСУ, 2010.
6. ФЗ №123-ФЗ, от 22 июля 2008 г. «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».
7. ГОСТ 22.0.05-97. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Термины и определения.
8. ГОСТ Р 22.3.03-94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Защита населения. Основные положения.
9. СТО 01422789-001-2009. Проектирование высотных зданий. – М.: ЦНИИЭП жилища.