

В.С. ФЕДОРОВ¹, В.Е. ЛЕВИТСКИЙ¹¹«Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ) г. Москва, Россия

ТЕРМОСИЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОПОРАХ

Аннотация. Показана работа балки с частичным ограничением перемещений на опорах в условиях резкорегимного высокотемпературного нагрева вплоть до разрушения. В зависимости от уровня ограничения вращательной жёсткости выявлена последовательность образования пластических шарниров на опорах и в пролёте, влияющая на время сопротивления балки. Сформулированы условия, при которых ограничения перемещений опор приводят к формированию адаптационных механизмов сопротивления.

Время, в течение которого балка сопротивляется изгибу, и предельное время сопротивления зависят от сочетания уровня жёсткости осевых и вращательных опорных закреплений. Повышение уровня ограничения вращательной жёсткости в большинстве случаев приводит к увеличению как времени сопротивления изгибу балки, так и предельного времени сопротивления. При обеспечении конструктивными мероприятиями уровней жёсткости опорных закреплений в определённых пределах, возможно существенно повысить огнестойкость балки за счёт формирования адаптационных механизмов сопротивления.

Ключевые слова: изгибаемый элемент, высокотемпературный нагрев, пластические шарниры, мембранный эффект, работа как висячей системы, жёсткость осевых и угловых опорных закреплений, осевые ограничения, ограничения вращения, большие прогибы, время сопротивления изгибу, предельное время сопротивления.

V.S. FEDOROV¹, V.E. LEVITSKY¹¹"Russian University of Transport" RUT (MIIT), Moscow, Russia

THERMAL RESISTANCE OF A REINFORCED CONCRETE BEAM WITH RESTRICTED MOVEMENT ON SUPPORTS

Abstract. The work of a beam with partial limitation of displacements on supports under conditions of unsteady high-temperature heating up to destruction is shown. Depending on the level of limitation of the rotational stiffness, the sequence of the formation of plastic hinges on the supports and in the span was revealed, which affects the resistance time of the beam. The conditions are formulated under which restrictions on the displacement of supports lead to the formation of adaptive resistance mechanisms. The time during which the beam resists bending and the ultimate resistance time depend on the combination of the stiffness level of the axial k_a and rotational k_r of the anchors. An increase in the level of limitation of the rotational stiffness k_r in most cases leads to an increase in both the time of resistance to bending of the beam and the limiting time of resistance. With the provision of structural measures for the stiffness levels of the support fastenings k_a and k_r within certain limits, it is possible to significantly increase the fire resistance of the beam due to the formation of adaptive resistance mechanisms.

Keywords: flexible element, high temperature heating, plastic hinge, membrane action, catenary action, stiffness of axial and rotational restrain, large deflections, bending resistance time, ultimate resistance time.

Введение

Повышение качества расчётного обоснования сопротивляемости зданий и сооружений в условиях пожара связано с повышением сложности проектных решений, развитием возможностей вычислительной техники и применением объектно-

ориентированного подхода к оценке безопасности зданий, допускающего вариативность мероприятий защиты в зависимости от требуемых критериев.

Существующие расчётные методы [1-3], в том числе нормативные (СП 468.1325800.2019), основываются на оценке огнестойкости отдельных конструкций, вне связи с несущей системой здания. Однако в составе несущей системы проявляется совместная работа конструкций, ограничиваются температурные деформации, происходит перераспределение внутренних усилий между элементами с различной жёсткостью, что оказывает существенное влияние на огнестойкость.

Известно некоторое количество экспериментальных [2, 4] и численных [6-8] исследований, посвященных оценке поведения конструкций в условиях нестационарного высокотемпературного нагрева и ограничения перемещений на опорах. Однако их результаты разрознены и фрагментарны, систематического теоретического обобщения в этом направлении не проводилось, не выявлены количественные и качественные условия, при которых реализуются те или иные механизмы поведения конструкций.

В работах R. Park [8, 9], R.H. Wood [10], P.E. Regan [11] на примере опёртых по контуру плит, а также линейных элементов в условиях нормальной температуры и ограничения перемещений на опорах были сформулированы понятия Compressive Membrane Action (СМА) и Tensile Membrane Action (ТМА), что можно определить как растягивающий и сжимающий мембранный эффект. Действие сжимающих усилий распора формирует механизм арочной мембраны, а после исчерпания несущей способности опасного сечения при изгибе формируется механизм действия контактной (цепной) растягивающей мембраны – Catenary Action, что в отечественной литературе получило название *стадии работы как висячей системы* (СП 385.1325800.2018). Оба эти механизма повышают несущую способность конструкции за счёт формирования альтернативных траекторий передачи нагрузки.

В последующем основной интерес исследований был сосредоточен на механизме сжимающего мембранного эффекта при относительно небольших прогибах из-за его практической важности для проектных приложений [12, 13]. Увеличение несущей способности из-за действия растягивающего мембранного эффекта не удаётся использовать в условиях эксплуатации, так как прогибы будут неприемлемо высокими, однако это имеет существенное значение для анализа устойчивости конструкций в условиях воздействия запроектных нагрузок [14] или пожара, когда учёт реального поведения при разрушении становится критически важным.

Сжимающий и растягивающий мембранный эффект при нормальной температуре

Развитие мембранного эффекта в балочных неразрезных изгибаемых элементах с ростом нагрузки в нормальных температурных условиях можно разделить на три последовательных стадии, как показано на рисунке 1: сжимающий мембранный эффект; переходное состояние; растягивающий мембранный эффект [12].

На графике нагрузка – прогиб (рисунок 2) сжимающему мембранному эффекту соответствует участок АВ, когда при ограничении перемещений балки наружу возникает сжимающее продольное усилие (распор). Поскольку прогибы относительно малы по сравнению с высотой балки, сжатая зона сечения в середине пролёта расположена выше, чем рабочая линия сил сжатия на опорах. Таким образом, создаётся сжимающая дуга, которая может значительно увеличить несущую способность изгибаемого элемента.

Участок ВС соответствует переходной области, когда с развитием прогибов линия действия усилий распора и нейтральная ось балки постепенно сближаются, несущая способность балки снижается до тех пор, пока усилия распора не станут равны нулю (точка С). Для балок большой высоты это сопровождается разрушением сжатого бетона в опорных сечениях, для невысоких балок и плит – потерей устойчивости.

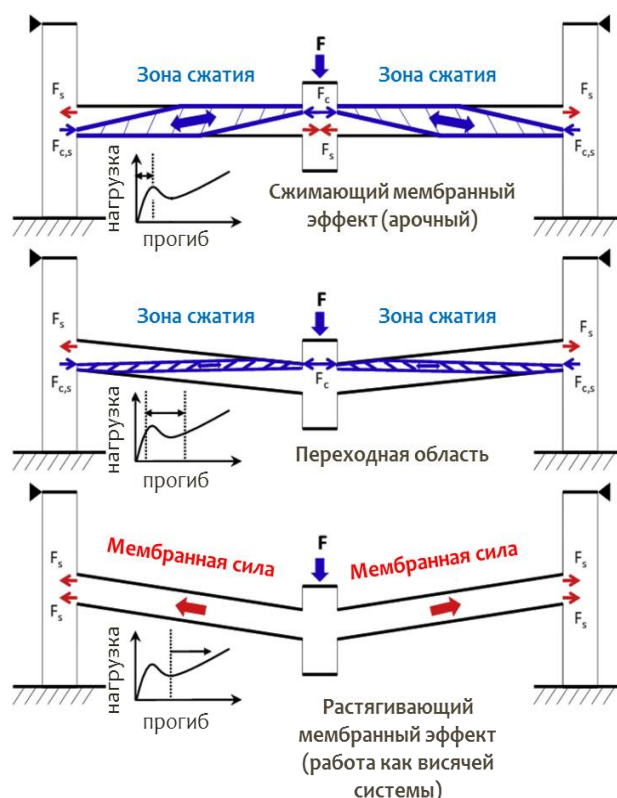


Рисунок 1 - Различные стадии развития мембранного эффекта

При дальнейшем развитии прогибов начинается действие растягивающего мембранного эффекта (участок СЕ) – несущая способность вновь растёт из-за ограничения продольных перемещений опор вовнутрь плиты, нагрузка полностью передаётся за счёт растянутой арматуры до достижения предельной деформации текучести (точка Е).

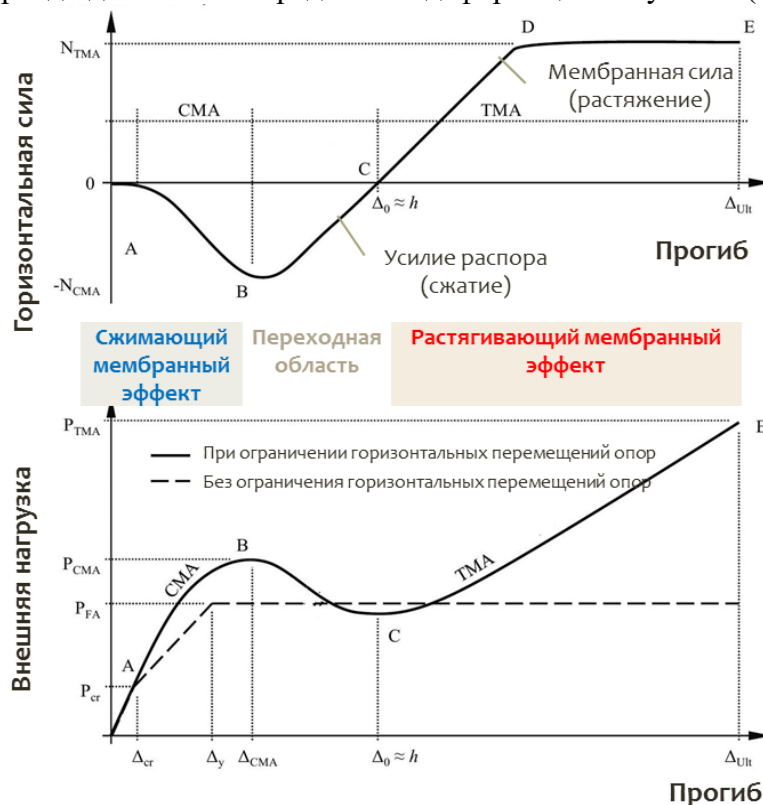


Рисунок 2 - Изменение прогиба и продольного усилия с ростом нагрузки для изгибаемого элемента с ограничением перемещений на опорах в соответствии с Guice and Rhomberg [12]

Сжимающий и растягивающий мембранный эффект при нестационарном нагреве в условиях пожара

На основе анализа научных исследований в данной работе представлена физическая модель поведения изгибаемого элемента при воздействии внешней нагрузки и нестационарного теплового воздействия, характерного для условий пожара.

В условиях пожара внешняя нагрузка на конструкцию остаётся неизменной, а снижение несущей способности и жёсткости сечений происходит из-за температурной деградации прочностных и деформативных свойств материала.

Для изгибаемого элемента, работающего в условиях ограничения жёсткости опорных закреплений (рисунок 3), на начальных этапах нагрева из-за ограниченного теплового расширения возникает осевое сжимающее усилие распора. Конечное значение сжимающей силы соответствует образованию пластичного шарнира в критическом сечении (либо в пролете, либо на опорах), после чего происходит резкий спад сжимающей силы до тех пор, пока не произойдет исчерпание несущей способности балки при изгибе. Если балка способна переходить в стадию работы как висячей системы, характеризующейся изменением осевой силы от сжатия к растяжению, она может выдержать более длительное воздействие температуры, превышающее сопротивление изгибу.

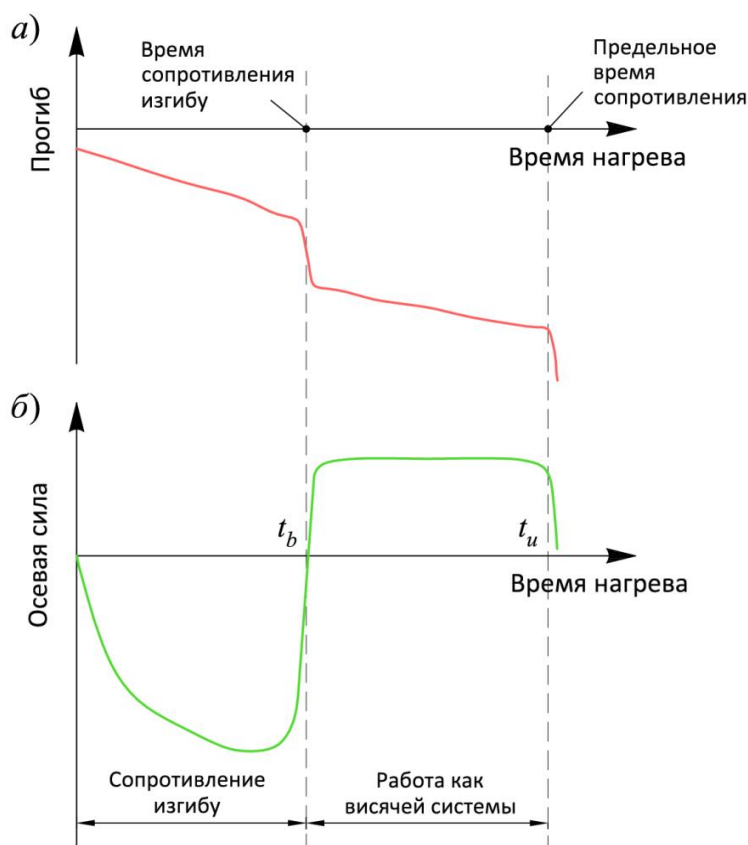


Рисунок 3 - Изменение прогиба (а) и продольного усилия (б) во времени нагрева для изгибаемого элемента с ограничением перемещений на опорах

В общем случае для анализа поведения балки с частичным ограничением перемещений на опорах принимается расчётная схема с упругоподатливыми опорами, изменение жёсткости которых моделирует ограничение осевых и вращательных перемещений (рисунок 4, а).

Начальные (до нагрева) коэффициенты ограничения осевой и вращательной жёсткости балки на опоре имеют вид:

$$k_a = \frac{K_A}{EA/L}, \quad k_r = \frac{K_R}{4EJ/L},$$

где K_A и K_R – жёсткости осевого и вращательного ограничений на опоре; EA и EJ – осевая и изгибная жёсткость балки при нормальной температуре; L – пролёт балки.

Взаимосвязь между коэффициентом ограничения вращательной жёсткости k_R и начальным опорным моментом (до нагрева) иллюстрирует диаграмма взаимодействия «момент – угол поворота на опоре» (рисунок 4,б):

$$\frac{M}{M_{fix}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2k_r}}. \quad (1)$$

В выражении (1) и на рисунке 4 M_{fix} – момент на опоре балки с жёсткой заделкой; θ_0 – угол поворота балки на опоре при свободном опирании.

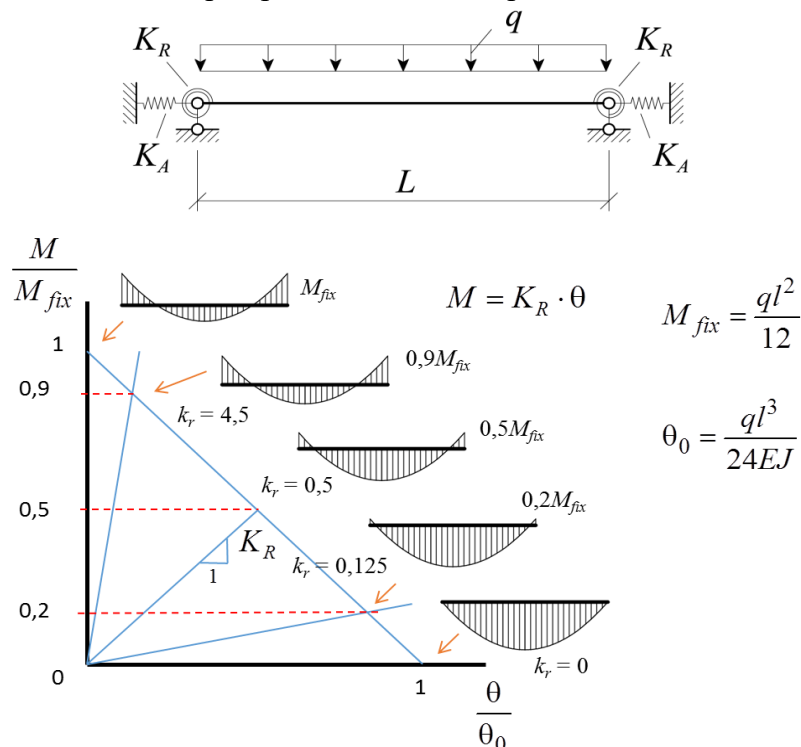


Рисунок 4 - Расчётная схема изгибаемого элемента с варьируемыми граничными условиями (а), диаграмма взаимодействия «момент – угол поворота на опоре» (б)

Увеличение коэффициентов ограничения жёсткости осевого и вращательного перемещений на опоре приводит к повышению соответственно продольных усилий распора T и опорных моментов M . Точка приложения продольного усилия на опоре относительно центральной оси изгибаемого элемента характеризуется эксцентриситетом

$$e_0 = M/T.$$

Линия действия усилий распора меняет свое положение в процессе нагрева: вначале она расположена около нижней грани сечения, затем постепенно поднимается вверх.

Положительное влияние усилий распора, создающих разгружающий момент и уменьшающих прогиб в процессе нагрева, сохраняется до тех пор, пока центральная ось элемента в середине пролёта находится выше линии распора (рисунок 5):

$$(e_0 - \Delta) > 0,$$

где Δ – прогиб в середине пролёта.

По этой причине высокие уровни ограничения жёсткости вращательных перемещений на опоре, создающие значительные изгибающие опорные моменты, повышают время

сопротивления изгибу балки (рисунок 6).

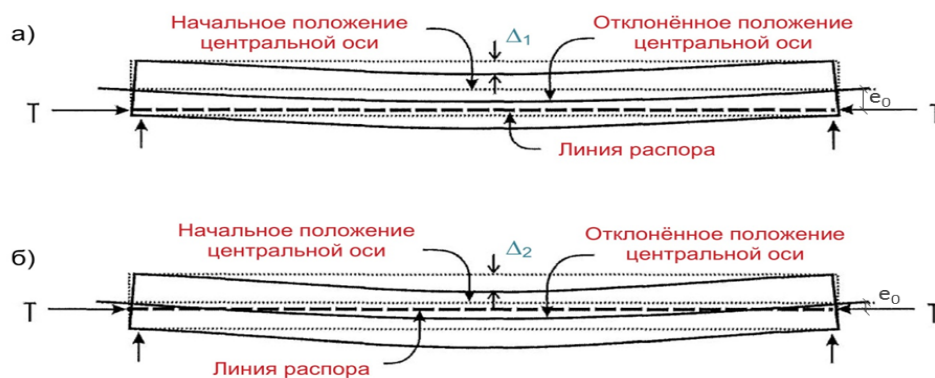


Рисунок 5 - Благоприятное (а) и неблагоприятное (б) влияние усилий распора

Механизм истощения несущей способности при изгибе и последующую работу балки как висячей системы в условиях нестационарного нагрева при некотором значении k_a и различных уровнях ограничения вращательной жёсткости на опорах k_r можно разделить на четыре характерных области (см. рисунок 6).

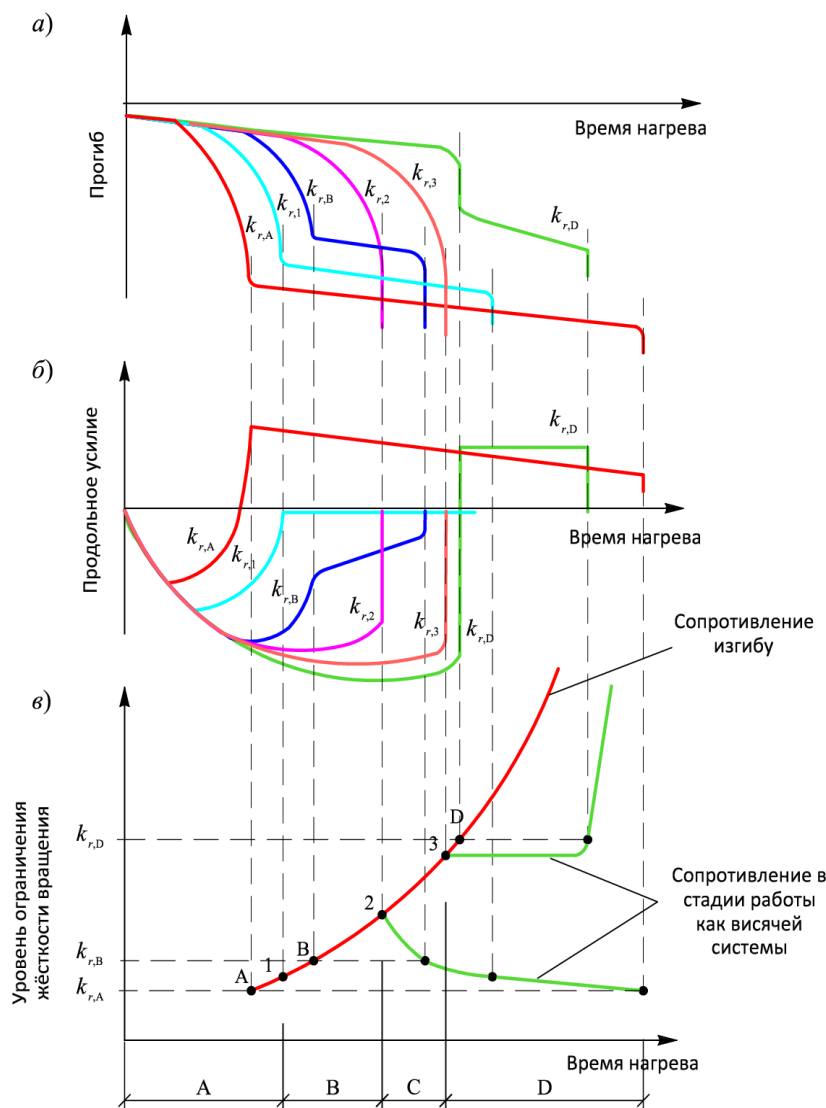


Рисунок 6 - Изменение прогиба (а), продольного усилия (б) и времени сопротивления (в) при нагреве изгибаемого элемента с различным уровнем ограничения жёсткости вращательных перемещений на опорах

Когда k_r меньше первого граничного значения (область А, $k_{r,A} < k_{r,1}$), сопротивление изгибу балки определяется максимальным пролётным моментом. После образования в пролёте пластического шарнира моменты передаются на опоры, но вращательная жёсткость опорных закреплений оказывается недостаточной для их восприятия, и при наличии верхнего непрерывного армирования балка начинает работать как висячая система. Однако эта стадия является нестабильной и предельное время сопротивления t_u быстро снижается с увеличением жёсткости k_r (см. рисунок 6, в).

Первое граничное значение вращательной жёсткости опорных закреплений $k_{r,1}$ соответствует случаю, когда после образования пластического шарнира в пролёте осевая сила снижается до нуля.

При дальнейшем увеличении вращательной жёсткости опорных закреплений (область В, $k_{r,1} < k_{r,B} < k_{r,2}$) после образования пластического шарнира в пролёте в балке частично остаётся сжимающая осевая сила, которая оказывает неблагоприятное влияние на сопротивление балки изгибу. Опоры балки обладают при этом достаточной вращательной жёсткостью, чтобы воспринимать передающиеся на них моменты. Через некоторое время происходит разрушение балки из-за образования пластических шарниров на опорах, продольная сила снижается до нуля.

Второе граничное значение вращательной жёсткости опорных закреплений $k_{r,2}$ соответствует случаю, когда раздробление бетона в опорных сечениях происходит одновременно с образованием пластического шарнира в пролёте. Предельное время сопротивления и время сопротивления изгибу при данном значении k_r совпадают ($t_u = t_b$).

В области С ($k_{r,2} < k_{r,C} < k_{r,3}$) пластические шарниры образуются вначале в опорных сечениях, а через некоторое время – в пролёте. Продольная сила при этом также снижается до нуля. В областях В и С балка области не может работать как висячая система, так как не существует непрерывной траектории передачи растягивающего усилия.

Дальнейшее увеличение вращательной жёсткости опорных закреплений (область D, $k_{r,D} > k_{r,3}$) приводит к тому, что хрупкое раздробление сжатого бетона в опорных сечениях происходит раньше образования пластического шарнира в пролёте. Балка при этом оказывается на двух шарнирно-неподвижных опорах и вновь возможна её работа как висячей системы. Предельное время сопротивления при этом практически не зависит от уровня ограничения вращательной жёсткости k_r , поскольку определяется критической температурой прогрева нижней пролётной арматуры.

Изменение уровня ограничения осевой жёсткости k_a приводит к некоторой трансформации стадий работы при сохранении общего вида диаграммы «уровень ограничения жёсткости k_r – время сопротивления». В частности, сокращается протяжённость областей В и С.

Выводы

1. Время, в течение которого балка сопротивляется изгибу, и предельное время сопротивления зависят от сочетания уровня жёсткости осевых k_a и вращательных k_r опорных закреплений.
2. Повышение уровня ограничения вращательной жёсткости k_r в большинстве случаев приводит к увеличению как времени сопротивления изгибу балки, так и предельного времени сопротивления.
3. При обеспечении конструктивными мероприятиями уровней жёсткости опорных закреплений k_a и k_r в определённых пределах, возможно существенно повысить огнестойкость балки за счёт формирования адаптационных механизмов сопротивления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. М.: Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. 382 с.
2. Милованов А.Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. М.: Стройиздат, 1998. 304 с.
3. Прочностной расчет железобетонных плит при пожаре с использованием программной среды ANSYS / А.В. Ширко, А.Н. Камлюк, И.И. Полевода, Н.В. Зайнудинова // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. 2014. № 1 (19). С. 48-58.
4. Kodur V.K.R., Dwaikat M.B. A numerical model for predicting the fire resistance of reinforced concrete beams // *Cement and Concrete Composites*. 2007. No. 8(4). pp. 1-13.
5. Albrifkani S., Wang Y.C. Explicit modelling of large deflection behaviour of restrained reinforced concrete beams in fire // *Engineering Structures Journal*. 2016. Vol. 121. pp. 97-119.
6. Lim L., Buchanan A.H., Moos P.J. Restraint of fire-exposed concrete floor systems // Second International Workshop «Structures in Fire». Christchurch. March 2002. pp. 61-82.
7. Simplified multi-iteration method for restrained beams under fire / L.M. Lu, Y. Yuan, E. Annerel, L. Taerwe // *Material and Structures*. 2015. No. 48(1). pp. 9-19.
8. Park R. Tensile membrane behaviour of uniformly loaded rectangular reinforced concrete slabs with fully restrained edges // *Magazine of Concrete Research*. 1964. Vol. 16. No. 46, pp. 39-44.
9. Park R., Gamble W. Reinforced Concrete Slabs. John Wiley and Sons, Inc. 2000.
10. Wood R.H. Plastic and elastic design of slabs and plates, with particular reference to reinforced concrete slabs. Thames and Hudson. London. 1961.
11. Regan P.E. Catenary Action in Damaged Concrete Structures // ACI Publication SP-48, Industrialization in Concrete Building Construction. 1975. pp. 191-224.
12. Guice L.K., Slawson T.R., Rhomberg E.J. Membrane analysis of flat plate slabs // *ACI Structural Journal*. 1989. Title no. 86-SLO. pp. 83-92.
13. Vecchio F.J., Tang K. Membrane action in reinforced concrete slabs // *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1990. Vol. 17. pp. 686-697.
14. Колчунов В. И., Ключева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений. М.: АСБ, 2014. 208 с.

REFERENCES

1. Roytman V.M. Inzhenernyye resheniya po otsenke ognestoykosti proyektiruyemykh i rekonstruiruyemykh zdaniy [Engineering solutions for assessing the fire resistance of designed and reconstructed buildings]. Moscow: Publishing of Association «Pozharnaya bezopasnost' i nauka», 2001. 382 p.
2. Milovanov A.F. Stoykost' zhelezobetonnykh konstruktsiy pri pozhare [Resistance of reinforced concrete structures in case of fire]. Moscow: Stroyizdat, 1998. 304 p.
3. Shirko A.V., Kamlyuk A.N., Polevoda I.I., Zaynudinova N.V. Prochnostnoy raschet zhelezobetonnykh plit pri pozhare s ispol'zovaniyem programmnoy sredy ANSYS [Strength calculation of reinforced concrete slabs in case of fire using the ANSYS software]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MCHS Respubliki Belarus'*. 2014. No 1 (19). P. 48-58.
4. Kodur V.K.R., Dwaikat M.B. A numerical model for predicting the fire resistance of reinforced concrete beams. *Cement and Concrete Composites*. 2007. No. 8(4). pp. 1-13.
5. Albrifkani S., Wang Y.C. Explicit modelling of large deflection behaviour of restrained reinforced concrete beams in fire. *Engineering Structures Journal*. 2016. Vol. 121. pp. 97-119.
6. Lim L., Buchanan A.H., Moos P.J. Restraint of fire-exposed concrete floor systems. Second International Workshop «Structures in Fire». Christchurch. March 2002. pp. 61-82.
7. Lu L.M., Yuan Y., Annerel E., Taerwe L. Simplified multi-iteration method for restrained beams under fire. *Material and Structures*. 2015. No. 48(1). pp. 9-19.
8. Park R. Tensile membrane behaviour of uniformly loaded rectangular reinforced concrete slabs with fully restrained edges. *Magazine of Concrete Research*. 1964. Vol. 16. No. 46, pp. 39-44.
9. Park R., Gamble W. Reinforced Concrete Slabs. John Wiley and Sons, Inc. 2000.
10. Wood R.H. Plastic and elastic design of slabs and plates, with particular reference to reinforced concrete slabs. Thames and Hudson. London. 1961.
11. Regan P.E. Catenary Action in Damaged Concrete Structures. ACI Publication SP-48, Industrialization in Concrete Building Construction. 1975. pp. 191-224.
12. Guice L.K., Slawson T.R., Rhomberg E.J. Membrane analysis of flat plate slabs. *ACI Structural Journal*. 1989. Title no. 86-SLO. pp. 83-92.
13. Vecchio F.J., Tang K. Membrane action in reinforced concrete slabs. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1990. Vol. 17. pp. 686-697.

14. Kolchunov V.I., Klyuyeva N.V., Androsova N.B., Bukhtiyarova A.S. Zhivuchest' zdaniy i sooruzheniy [The survivability of buildings and structures]. Moscow: ASV, 2014. 208 p.

Информация об авторах:

Федоров Виктор Сергеевич

Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия,
академик РААСН, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения».

E-mail: fvs_skzs@mail.ru

Левицкий Валерий Евгеньевич

Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения».

E-mail: dobriy_vecher@mail.ru

Information about authors:

Fedorov Victor S.

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,
academician of RAACS, doctor of technical sciences, head of the department «Building structures, buildings and structures».

E-mail: fvs_skzs@mail.ru

Levitskiy Valery E.

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,
associate professor of the department «Building Constructions, Buildings and Structures».

E-mail: dobriy_vecher@mail.ru