



УДК 614.841.332(083.7)

## ОСОБЕННОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ ВОЗДЕЙСТВИЮ ПОЖАРА В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕНИЯ ЖЁСТКОСТИ ОСЕВЫХ И ВРАЩАТЕЛЬНЫХ ОПОРНЫХ ЗАКРЕПЛЕНИЙ

*В. С. Федоров, В. Е. Левитский, В. Е. Матвиенко*

*«Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ), г. Москва, Россия*

Известны экспериментальные и численные исследования, посвященные оценке поведения конструкций в условиях нестационарного высокотемпературного нагрева и ограничения перемещений на опорах [1–17]. 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 данной статье показана работа балки с частичным ограничением осевых и вращательных перемещений на опорах при нестационарном высокотемпературном нагреве 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 адаптивных механизмов сопротивления.

**Ключевые слова:** *пластические шарниры, мембранный эффект, работа как висячей системы, жёсткость ограничения перемещений, осевые ограничения, ограничения вращения, большие прогибы, время сопротивления изгибу, предельное время сопротивления.*

## FEATURES OF RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS TO FIRE IN CONDITIONS OF LIMITING THE RIGIDITY OF AXIAL AND ROTATIONAL SUPPORT ANCHORAGES

*V. S. Fedorov, V. E. Levitsky, V. E. Matvienko*

*Russian University of transport RUT (MIIT), Moscow, Russia*

Well-known experimental and numerical studies devoted to evaluating the behavior of structures under conditions of non-stationary high-temperature heating and limiting movement on supports [1-17]. However, their results are scattered and fragmentary, systematic theoretical generalization in this direction has not been carried out, quantitative and qualitative conditions under which certain mechanisms of structural behavior are implemented have not been identified. The research shows the operation of a beam with partial restriction of axial and rotational movements on supports under conditions of non-stationary high-temperature heating up to destruction. Depending on the level of restriction of rotational stiffness, the sequence of formation of plastic hinges on the supports and in the span, which affects the time of resistance of the beam, is revealed. The conditions under which restrictions on the movement of supports lead to the formation of adaptive resistance mechanisms are formulated.

**Keywords:** *plastic hinges, membrane effect, operation as a hanging system, stiffness of movement restrictions, axial restrictions, rotation restrictions, large deflections, bending resistance time, limit resistance time.*

### Введение

В последнее время в разных странах значительное внимание уделяется улучшению качества расчётного обоснования сопротивляемости зданий и сооружений воздействию пожара. Это 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 [4].

Известны результаты экспериментальных [2, 5] 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. Не проводилось систематического теоретического обобщения в этом направлении, не

выявлены количественные и качественные условия, при которых реализуются те или иные механизмы поведения конструкций.

В условиях нормальной температуры начало исследований поведения изгибаемых элементов, частично закреплённых от смещений в продольном направлении и поворота на опорах, было положено в середине прошлого века фундаментальными работами R. Park [9, 10], R.H. Wood [11], P.E. Regan [12]. В данных трудах на примере вначале опёртых по контуру плит, а затем и линейных элементов были сформулированы понятия Compressive Membrane Action (CMA) и Tensile Membrane Action (TMA), что можно определить как растягивающий и сжимающий мембранный эффекты. Действие сжимающих усилий распора формирует механизм арочной мембраны. После исчерпания несущей способности опасного сечения при изгибе формируется механизм действия контактной (цепной) растягивающей мембраны – Catenary Action, которая в отечественной литературе получила 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 последующие десятилетия основной интерес исследователей был направлен на изучение меха-

низма сжимающего мембранного эффекта при относительно небольших прогибах который имеет практическое значение для проектных приложений [13, 14]. 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 при воздействии запроектных нагрузок [15] или пожара, когда учёт реального поведения при разрушении становится критически важным.

### Сжимающий и растягивающий мембранный эффекты 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; переходное состояние; растягивающий [13].

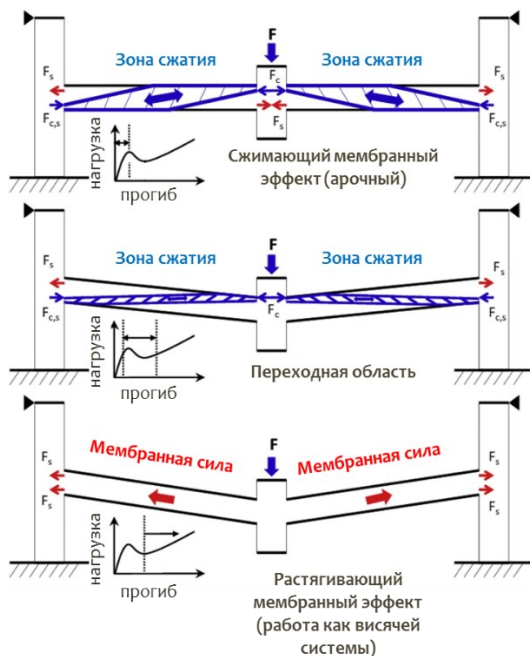


Рис. 1. Различные стадии развития мембранного эффекта

На графике нагрузка – прогиб (рис. 2) сжимающему мембранному эффекту соответствует участок АВ, на котором 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 данный процесс сопровождается разрушением сжатого бетона в опорных сечениях, для невысоких балок и плит – потерей устойчивости.

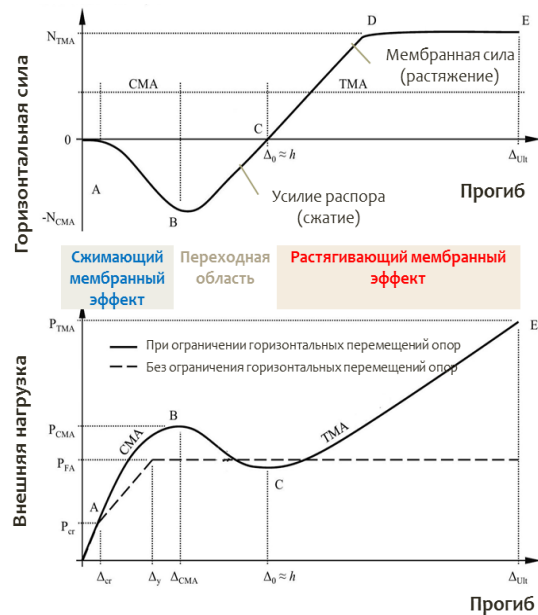


Рис. 2. Изменение прогиба и продольного усилия с ростом нагрузки для изгибаемого элемента с ограничением перемещений на опорах в соответствии с Guice and Rhomberg [13]

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).

### Сжимающий и растягивающий мембранный эффекты при нестационарном нагреве в условиях 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 (рис. 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 этого происходит резкий спад сжимающей силы до тех пор, пока не исчерпается несущая способность балки при изгибе. Если балка способна переходить в стадию работы как висячей системы, характеризующейся изменением осевой силы от сжатия к растяжению, то она может выдержать более длительное воздействие температуры, превышающее сопротивление изгибу.

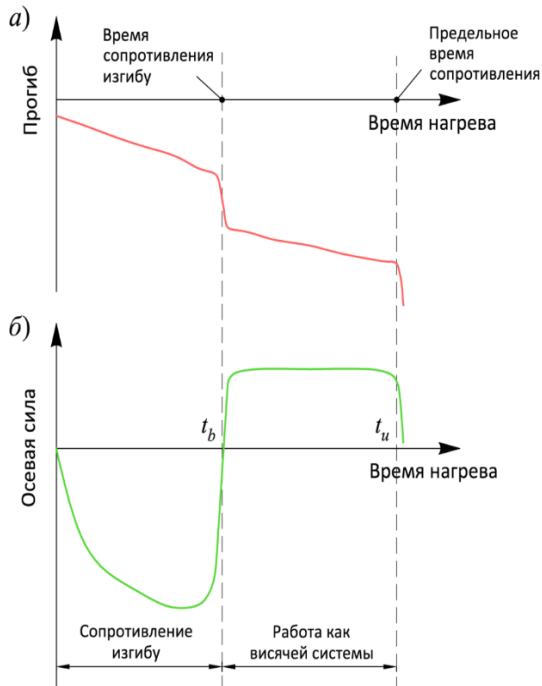


Рис. 3. Изменение прогиба (а) и продольного усилия (б) во времени нагрева для изгибаемого элемента с ограничением перемещений на опорах

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 (рис. 4, а).

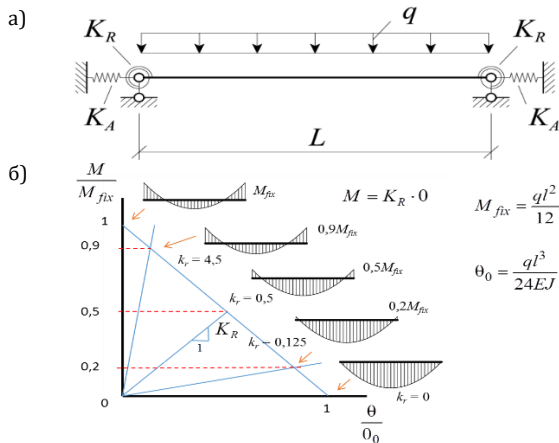


Рис. 4. Расчётная схема изгибаемого элемента с варьируемыми граничными условиями (а), диаграмма взаимодействия «момент – угол поворота на опоре» (б)

Коэффициенты ограничения осевой и вращательной жёсткости балки на опоре:

$$k_a = \frac{K_A}{EA/L}, \quad k_r = \frac{K_R}{4EJ/L} \quad (1)$$

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» (рис. 4, б):

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

В выражении (2) и на рисунке 4  $M_{fix}$  – момент на опоре балки с жёсткой заделкой;  $\theta_0$  – угол поворота балки на опоре при свободном опирании.

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:

$$e_0 = M/T. \quad (3)$$

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 (рис. 5):

$$(e_0 - \Delta) > 0, \quad (4)$$

где  $\Delta$  – прогиб в середине пролёта.

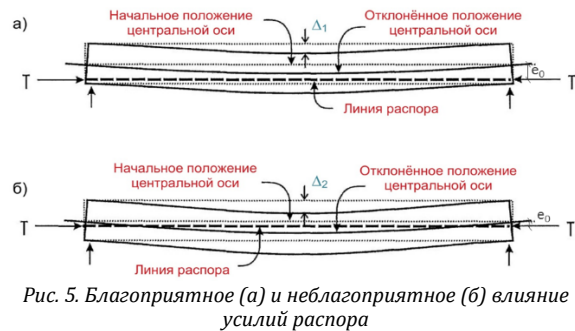


Рис. 5. Благоприятное (а) и неблагоприятное (б) влияние усилий распора

По этой причине высокие уровни ограничения жёсткости вращательных перемещений на опоре, создающие значительные изгибающие опорные моменты, повышают время сопротивления изгибу балки (рис. 6).

Механизм исчерпания 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 (рис. 6).

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  $k_r$  (рис. 6, в).

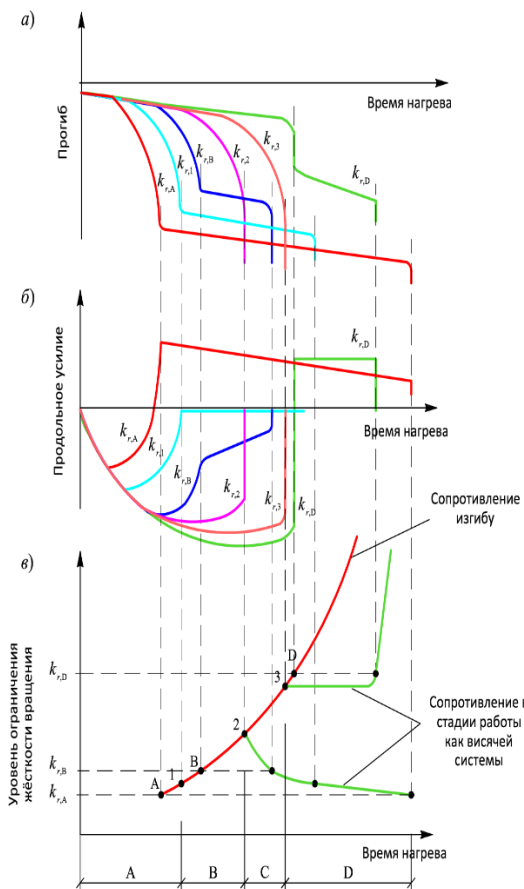


Рис. 6. Изменение прогиба (а), продольного усилия (б) и времени сопротивления (в) при нагреве изгибаемого элемента с различным уровнем ограничения жёсткости вращательных перемещений на опорах

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 вос-

принимать 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 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, можно 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 / В. М. Ройтман. – М. : Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. – 382 с.
2. Милованов А. Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре / А. Ф. Милованов. – М. : Стройиздат, 1998. – 304 с.
3. Ширко А. В. 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. Пчелинцев А. В. Влияние совместной работы конструкций на огнестойкость зданий и сооружений / А. В. Пчелинцев, А. Вл. Пчелинцев // Обеспечение огнестойкости зданий и сооружений при применении новых строительных материалов и конструкций : мат-лы сем. МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского. – М. : Знание, 1988. – С. 115–119.
5. Kodur V. K. R. A numerical model for predicting the fire resistance of reinforced concrete beams / V. K. R. Kodur, M. B. Dwaikat // Cement and Concrete Composites. – 2007. – № 8 (4). – С. 1–13.
6. Albrifkani S. Explicit modelling of large deflection behaviour of restrained reinforced concrete beams in fire / S. Albrifkani, Y. C. Wang // Engineering Structures Journal. – 2016. – Vol. 121. – P. 97–119.
7. Lim L. Restraint of fire-exposed concrete floor systems. Second International Workshop «Structures in Fire» / L. Lim, A. H. Buchanan, P. J. Moos // Christchurch. – March 2002. – P. 61–82.
8. Lu L. M. A simplified multi-iteration method for restrained beams under fire / L. M. Lu, Y. Yuan, E. Annerel, L. Taerwe // Material and Structures. – 2015. – № 48 (1). – P. 9–19.
9. Park R. Tensile membrane behaviour of uniformly loaded rectangular reinforced concrete slabs with fully restrained edges / R. Park // Magazine of Concrete Research. – 1964. – Vol. 16, № 46. – P. 39–44.
10. Park R. Reinforced Concrete Slabs / R. Park, W. Gamble. – John Wiley and Sons, Inc., 2000.
11. Wood R. H. Plastic and elastic design of slabs and plates, with particular reference to reinforced concrete slabs / R. H. Wood. – London : Thames and Hudson, 1961.
12. Regan P. E. Catenary Action in Damaged Concrete Structures / P. E. Regan // ACI Publication SP-48, Industrialization in Concrete Building Construction. – 1975. – P. 191–224.
13. Guice L. K. Membrane analysis of flat plate slabs / L. K. Guice, T. R. Slawson, E. J. Rhombert // ACI Structural Journal. – 1989. – Title no. 86-S10. – P. 83–92.
14. Vecchio F. J., Tang K. Membrane action in reinforced concrete slabs / F. J. Vecchio, K. Tang // Canadian Journal of Civil Engineering. – 1990. – Vol. 17. – P. 686–697.
15. Колчунов В. И. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях / В. И. Колчунов, Н. В. Клюева, Н. Б. Андреева, А. С. Бухтиярова. – М. : АСВ, 2014. – 208 с.
16. Kupchikova N. V. Analytical method used to calculate pile foundations with the widening up on a horizontal static impact / N. V. Kupchikova, E. N. Kurbatskiy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – P. 012102.
17. Kupchikova N. Determination of pressure in the near-ground space pile terminated and broadening of the surface / N. Kupchikova // MATEC Web of Conferences. – 2018. – P. 04062.

© В. С. Федоров, В. Е. Левитский, В. Е. Матвиенко

#### Ссылка для цитирования:

Федоров В. С., Левитский В. Е., Матвиенко В. Е. Особенности сопротивления железобетонной балки воздействию пожара в условиях ограничения жёсткости осевых и вращательных опорных закреплений // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2021. № 1 (35). С. 38–42.

УДК 667.6

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВОЙСТВ АСБЕСТА В КУСКОВОЙ ФОРМЕ КАК ОТХОДА, ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

**К. С. Штенске, О. Н. Парамонова**

*Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия*

С каждым годом вопросы охраны окружающей среды становятся все актуальнее. Ввиду расширения масштабов производств предприятий, вызванных повышением спроса на продукцию, увеличились объемы образующихся загрязняющих веществ. Для снижения негативного воздействия на окружающую среду необходимо разработать и применить комплекс мероприятий по ее защите. Анализ технологических особенностей литейного производства позволил выявить, что выбросами в атмосферу можно пренебречь из-за незначительного количества, не превышающего предельно допустимые концентрации, а особое внимание следует уделить образующимся отходам. В данной статье представлены результаты исследования основных параметров свойств отхода на примере асбеста в кусковой форме. Особое внимание, по нашему мнению, должно быть уделено изучению дисперсного состава. Без знания параметров свойств веществ невозможно построить экологически эффективную и экономически выгодную систему снижения загрязнения окружающей среды.

**Ключевые слова:** параметры свойств, окружающая среда, твердые отходы производства и потребления, загрязняющие вещества.

## INVESTIGATION OF ASBESTOS PROPERTIES PARAMETERS IN A LUMP FORM AS WASTE GENERATED IN FOUNDRY

**O. N. Paramonova, K. S. Shtenske**

*Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia*

Every year the environmental protection issues are becoming more and more relevant. Due to the expansion of enterprise production caused by the raised demand for products, the volume of generated pollutants has increased. To reduce the negative impact on the environment it is necessary to develop and apply a set of measures to protect the environment. The analysis of the technological characteristics of foundry production has revealed that emissions into the atmosphere could be neglected due to a small amount not exceeding the maximum permissible concentrations, and the special attention should be paid to the generated waste. This article presents the results of the study of the main parameters of waste properties on the example of asbestos in a lump form. Particular attention, according to the authors, should be paid to the study of disperse composition. Without knowledge of the properties parameters of substances it is impossible to build an environmentally efficient and economically profitable system for reducing environment pollution.

**Keywords:** properties parameters, environment, solid waste of production and consumption, pollutants.