

УДК 624.042.1:004.942

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОРЕЖИМНОГО МЕХАНИЗМА  
ОТКАЗА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
ПРИ ДВУХОСНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ**

**MODELING OF A MULTI-MODE FAILURE MECHANISM  
OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES  
UNDER BIAXIAL STRESSES**

*О.В. КАБАНЦЕВ, Б. МИТРОВИЧ*  
*O.V. KABANTSEV, B. MITROVICH*

(Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет)  
(National Research Moscow State University of Civil Engineering)  
E-mail: ovk531@gmail.com; bozidarm@rambler.ru

*В работе рассматривается вопрос конечно-элементного моделирования отказа несущей железобетонной конструкции при двухосном напряженном состоянии с реализацией нескольких механизмов, соответствующих разным критериям прочности. Предложен и обоснован метод моделирования многорежимного механизма отказа путем поэтапного изменения расчетной модели в зонах отказа с использованием конечных элементов с параметрами жесткости, соответствующими условиям взаимодействия частей конструкции, разделенных трещиной.*

*This paper is dedicated to the topic of finite-element modeling of failure of load-bearing concrete structures under biaxial stress state with the implementation of several mechanisms corresponding to different strength criteria. Method of modeling a multi-mode failure mechanism by gradually changing the calculation model in in areas of failure using finite-elements with the stiffness parameters corresponding to the conditions of interaction of the parts of the structure separated by a crack is proposed and justified.*

**Ключевые слова:** моделирование, несущие конструкции, напряженно-деформированное состояние, расчетный прогноз, расчетная технология, расчетная модель, модель внутренних связей.

**Keywords: modeling, load-carrying structures, stress-and-strain state, design prediction, calculation technique, calculation model, model of external constraints.**

Оценка несущей способности конструкций зданий и сооружений, в том числе – существующих, является актуальной задачей для объектов промышленного (в отдельных случаях – гражданского) назначения. Для промышленных зданий легкой (текстильной) промышленности значимой особенностью является модернизация производственных процессов и технологий (по существу – реконструкция объекта), что зачастую сопровождается увеличением локальных или глобальных нагрузок. В отдельных случаях задачи реконструкции требуют внесения значимых изменений в несущей системе сооружения, что требует оценки влияния таких мероприятий на работоспособность и надежность конструктивной схемы, то есть оценки не превышения критериев предельных состояний как отдельных элементов конструкций, так и (что особенно важно!) несущей системы в целом. Для несущих систем рамной конструктивной схемы с преимущественно изгибаемыми или внецентренно сжатыми элементами разработаны методики учета явлений, вызываемых превышением несущей способности конструкции. В строительстве промышленных зданий широко применяются рамно-связевые конструктивные схемы из железобетона, однако для важнейших элементов таких схем – связевых панелей (стен) – учет отказов не имеет приемлемой методики моделирования.

Превышение несущей способности (отказ) несущих конструкций оценивается по системе критериев прочности. Использование совокупности (системы) критериев прочности представляет возможность учесть различные механизмы разрушения при оценке состояния конструкции в составе несущей системы. Концепция оценки критического состояния материала на основе совокупности критериев прочности изложена в работах А.А. Ильюшина [1], [2] и Я.Б. Фридмана [3].

На основе результатов исследований в [4] предложен общий подход к формирова-

нию совокупности критериев прочности, суть которого состоит в следующем: пусть меры тензора поврежденности  $M_n(\Omega)$ , являющиеся функциями компонент  $\Omega$ , могут быть использованы для формулирования критериев разрушения, соответствующих различным механизмам разрушения. Определим, что существуют константы критической поврежденности материала  $\Omega_n^{cr}$  такие, что если для любого  $n$

$$M_n(\Omega) < \Omega_n^{cr}, \quad (1)$$

то состояние частицы (элемента) прочно, а если для некоторого  $n=k$

$$M_k(\Omega) \geq \Omega_k^{cr}, \quad (2)$$

то происходит разрушение типа  $k$ .

Для изотропных материалов инвариантными мерами тензора  $\Omega$  являются функции  $k$  и  $q$ , которые, в свою очередь, выражают изменение деформационных свойств, определяющих поведение материалов (элементов) при гидростатическом давлении и чистом сдвиге соответственно.

Возможно, что разрушение элемента (локальной зоны элемента) по одному из критериев, принятых в рамках системы критериев, определит невозможность сопротивления воздействию только определенного вида, тогда как для иных видов воздействий частица может работать в составе общего ансамбля частиц (элементов несущей системы). Как показано в [4], формально это может быть выражено в скачкообразном увеличении до единицы некоторых компонент тензора поврежденности  $M_n(\Omega)$ . Анализ работы частиц (элементов расчетной модели) на основе совокупности (системы) критериев прочности позволяет различать механизмы разрушения и корректно учитывать состояние элементов в глобальной системе сооружения.

Так, например, при разрушении частицы, элемента по критерию сдвига указанная частица может оказаться в двух ва-

риантах состояния: в случае существования в зоне частицы напряжений сжатия частица будет воспринимать такие напряжения и участвовать в работе ансамбля частиц по критерию сдвига в рамках механизма трения; в случае существования в зоне частицы напряжений растяжения такая частица выбывает из состава ансамбля частиц исследуемого тела.

Для каменных конструкций, находящихся в двухосном напряженном состоянии, в [5], [6] исследованы механизмы разрушения и показано, что реализация таких механизмов не происходит одновременно, что обеспечивает работоспособность каменной конструкции даже при формировании разрушений.

Для железобетонных элементов необходимо учитывать работу входящих в состав таких конструкций арматурных стержней, которые при разрушении бетонного тела конструкции могут воспринимать (до определенного предела) напряжения растяжения без полного разрушения элемента, что было показано в многочисленных исследованиях работы железобетонных конструкций в пластической стадии (например, [7], [8]).

Необходимо учитывать, что возникновение локальных разрушений (отказов) в элементах несущей системы далеко не всегда приводит к глобальному разрушению несущей конструкции в целом или разрушению значимой его части. Проблемы такого рода рассматриваются в рамках оценки несущей способности конструктивной системы в целом при наличии локальных дефектов отдельных элементов (например, [9]), исследований живучести конструкций и несущих систем в целом, что весьма значимо при запроектных воздействиях (работы [10...12]).

Исследования, в рамках которых учитывается возникновение локального отказа в элементе несущей системы, выполняются, как правило, численными методами. Однако при численных исследованиях НДС несущих систем железобетонных зданий с использованием конечно-элементного подхода используют, в основном, метод моделирования локальных разрушений (отка-

зов) в железобетонных элементах путем редуцирования общей жесткости конечного элемента – без детализации по видам механизмов разрушения и остаточной несущей способности – [13], [14]. Такой метод моделирования может быть признан вполне приемлемым (с рядом существенных уточнений – [15]) для учета отказов в изгибаемых элементах.

Вместе с тем существует проблема моделирования отказов в стеновых железобетонных элементах, находящихся в двухосном напряженном состоянии. Моделирование отказа в таких конструкциях путем редуцирования обобщенной жесткости не позволяет учесть важнейшие особенности механизмов взаимодействия частей поврежденных конструктивных элементов и, как следствие, приводит к недооценке влияния тех элементов поврежденных конструкций, которые продолжают участвовать в работе.

Важность разработки методов моделирования отказов в плосконапряженных конструкциях (стенах) определяется тем, что такие конструкции позволяют создавать этажи повышенной жесткости, позволяющие обеспечить устойчивость зданий к прогрессирующему обрушению (общий принцип предложен и обоснован в [16], использован в работах [15], [17]).

Принципы моделирования механизмов отказа плосконапряженных железобетонных конструкций (стенах) должен соответствовать экспериментально установленным механизмам разрушения таких конструкций. Многочисленными исследованиями (детально представлены в [16]) установлено, что разрушение стен при двухосном напряженном состоянии происходит в несколько этапов. На первом этапе в стене формируется трещина в бетоне, что можно определить на основе критериев прочности, предложенных в [19], [20]. На следующих этапах развитие трещины с переходом к разрушению конструкции определяется работой арматуры, пересекающей трещину. Механизмы взаимодействия разделенных трещиной частей стены схематично представлены на рис. 1 (общая схема взаимодействия частей стены, разделенных трещи-

ной). При действии в зоне трещины напряжений растяжения (наиболее опасная расчетная ситуация) формируется "раскрытая" трещина, что позволяет несколько упростить схему взаимодействия разделенных

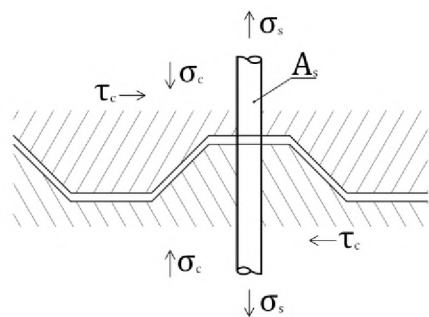


Рис. 1

частей с отказом от учета взаимного контакта бетона берегов трещины (рис. 2 – схема взаимодействия частей стены, разделенных "раскрытой" трещиной).

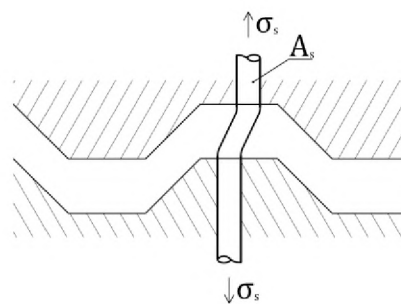


Рис. 2

В случае локального разрушения стены в зоне "раскрытой" трещины, вследствие сдвига берегов и включения в работу арматурных стержней, формируется нагельный эффект, который в общем виде может быть учтен по формулам, приведенным в [21]. Таким образом, стена в зоне трещины продолжает участвовать в работе в составе несущей системы из-за наличия арматурных элементов, формирующих нагельный эффект, вплоть до разрушения арматуры или смятия бетона в зоне ее анкеровки. Очевидно, что описанный процесс локального разрушения стены носит многоэтапный (многорежимный) характер и требует соответствующей реализации при моделировании.

Представляется возможным применить в качестве общего подхода к методам конечно-элементного моделирования отказов плосконапряженных железобетонных конструктивных элементов принципы структурного моделирования локальных разрушений каменной кладки, предложенные и обоснованные в [22], которые позволяют учитывать работоспособность поврежденной зоны конструкции по отдельным видам критериев прочности.

В рамках конечно-элементного моделирования конструктивный элемент стены аппроксимируется соответствующими типами конечных элементов плоского напряженного состояния. При выявлении на одном из этапов расчета невыполнения условия прочности по бетону необходимо в зоне

"разрушения (трещины)" выполнить изменение (редуцирование) жесткостных параметров "разрушенных" КЭ таким образом, чтобы была обеспечена жесткость, соответствующая условиям взаимодействия разделенных трещиной частей стены (с учетом режима сухого трения при наличии напряжений сжатия, либо с учетом нагельного эффекта в условиях "раскрытой" трещины). В упрощенном виде такая схема (в виде параллельно установленных в общих узлах двух конечных элементов) представлена на рис. 3 (схема моделирования стены разделенными КЭ: 1 – традиционная технология моделирования стены одним КЭ; 2 – КЭ, аппроксимирующий бетон; 3 – КЭ, аппроксимирующий условия взаимодействия частей стены, разделенных трещиной).

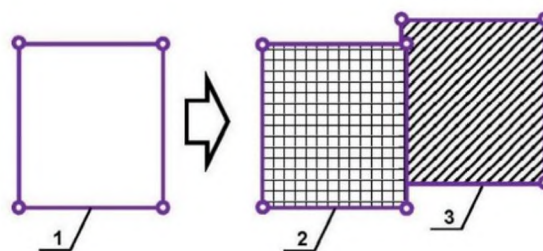


Рис. 3

Моделирование многорежимного механизма разрушения плосконапряженной железобетонной стены может быть выполнено в рамках многоэтапного расчетного анализа, учитывающего изменение расчет-

ной модели [23]. Расчетная модель плоско-напряженной стены формируется из двух слоев КЭ, параллельно установленных в общей сетке узлов. На начальном этапе в состав ансамбля активных ("действующих") элементов расчетной модели включены КЭ с жесткостными характеристиками бетона (рис. 3 – тип 2). При формировании разрушения в КЭ (по критериям прочности бетона) такой КЭ на следующем этапе расчета исключается из ансамбля активных элементов модели и на его место входит КЭ из параллельного слоя (рис. 3 – тип 3). Такой "новый" активный член расчетной модели должен обладать характеристиками жесткости, которые отражают взаимодействие разделенных трещиной частей стены. На последующих этапах расчета выполняется анализ прочности КЭ типа 3 (рис. 3) с редуцированием его жесткости в соответствии с условиями взаимодействия бетона по берегам трещины или исключением из модели при полном "разрушении".

## ВЫВОДЫ

Применение предложенных методов моделирования многорежимных механизмов отказов стеновых железобетонных конструкций при двухосном напряженном состоянии позволит корректно учесть их работу (в том числе при формировании локальных отказов) в составе несущей системы зданий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Ильюшин А.А.* Об одной теории длительной прочности // Инженерный журнал. Механика твердого тела. – 1967, №3. С 21...35.
2. *Ильюшин А.А.* Механика сплошной среды. – М.: Изд-во Московского университета, 1978.
3. *Фридман Я.Б.* Механические свойства металлов. – Ч. 1. Деформация и разрушение. – М.: Машиностроение, 1974.
4. *Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташинов А.А.* Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов / Под ред. Ю.В. Соколкина. – М.: Наука. Физмалит, 1997.
5. *Kabantsev O.* Modeling Nonlinear Deformation and Destruction Masonry under Biaxial Stresses. Part 1. Masonry as Simulation Object // Applied Mechanics and Materials. – 725...726, 2015. P. 681...696.
6. *Kabantsev O.* Modeling Nonlinear Deformation and Destruction Masonry under Biaxial Stresses. Part 2. Strength Criteria and Numerical Experiment // Applied Mechanics and Materials. – 725...726, 2015. P. 808...819.
7. *Попов Н.Н.* Динамический расчет железобетонных конструкций. – М.: СИ, 1974.
8. *Попов Н.Н., Распоргуев Б.С., Забегаев А.В.* Расчет конструкций на динамические и специальные нагрузки. – М.: Высшая школа, 1992.
9. *Кабанцев О.В., Горбатов С.В., Песин К.О.* Оценка влияния локальных дефектов перекрытия на основе учета поэтапного изменения расчетной схемы под нагрузкой // Вестник Томского гос. архитектур.-строит. ун-та. – 2015, №2. С.89...108.
10. *Колчунов В.И., Ключева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С.* Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. – М.: Изд-во АСВ, 2014.
11. *Tamrazyan A.* Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns // Applied Mechanics and Materials. – Т. 475...476, 2014. P.1563...1566.
12. *Алмазов В.О., Кхой Као Зуи.* Динамика прогрессирующего разрушения многоэтажных каркасов. – М.: Изд-во АСВ, 2013.
13. *Люблинский В.А., Тамразян А.Г.* Безопасность несущих систем многоэтажных зданий при локальном изменении жесткостных характеристик несущих элементов // В сб.: Бетон и железобетон – взгляд в будущее / Научн. тр. III Всероссийской (II Международной) конф. по бетону и железобетону: В семи томах. – 2014. С.90...99.
14. *Цыганенко Л.А.* Особливості розруханку висотних будинків не несучу здатність, стійкість та опір прогресуючому обвалению // Вестник Сумского нац. аграрн. ун-та (Украина). Серия "Строительство". – 2012 г. Вып. 5(16). С. 143..148.
15. *Домарова Е.В.* Расчетно-конструктивные методы защиты от прогрессирующего обрушения железобетонных монолитных каркасных зданий // Вестник ИрГТУ. – 2015, №10. С. 123...129.
16. *Кабанцев О.В.* Некоторые вопросы методики нормирования расчетов железобетонных конструкций высотных зданий // Межрегиональная общественная организация "Содействие развитию и применению пространственных конструкций в строительстве" (Тез. докл. научн. сессии). – М., 2009. С. 36...39.
17. *Руденко Д.В., Руденко В.В.* Защита каркасных зданий от прогрессирующего обрушения // Инженерно-строительный журнал. – 2009, №3. С.38...41.
18. *Ашкенадзе Г.Н., Соколов М.Е., Мартынова Л.Д. и др.* Железобетонные стены сейсмостойких зданий. Исследования и основы проектирования / Под ред. Г.Н. Ашкенадзе и М.Е. Соколова. – М.: Стройиздат, 1988.

19. Kupfer H.B. Das nicht-lineare Verhalten des Betons bei zweiachsiger Beanspruchung // Beton und Stahlbetonbau. – №11, 1973. P. 269...273.

20. Гениев Г.А. О линейном представлении условия прочности бетона // Теория и методы расчета строительных конструкций. ЦНИИСК, вып. 35. – М.: СИ. С. 38...44.

21. Пособие по проектированию жилых зданий / ЦНИИЭП жилища Госкомархитектуры. Вып. 3. Конструкции жилых зданий (к СНиП 2.08.01-85). – М.: СИ, 1989.

22. Кабанцев О.В. Дискретная модель каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния // Вестник Томского гос. архитектур.-строит. ун-та. – 2015, №4. С.113...134.

23. Перельмутер А.В., Кабанцев О.В. Анализ конструкций с изменяющейся расчетной схемой. – М.: Издательство СКАД СОФТ, Издательский дом АСВ, 2015.

#### REFERENCES

1. Il'jushin A.A. Ob odnoj teorii dlitel'noj prochnosti // Inzhenernyj zhurnal. Mekhanika tverdogo tela. – 1967, №3. S. 21...35.
2. Il'jushin A.A. Mekhanika sploshnoj sredy. – М.: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1978.
3. Fridman Ja.B. Mekhanicheskie svojstva metallov. – Ch. 1. Deformacija i razrushenie. – М.: Mashinostroenie, 1974.
4. Vil'deman V.Je., Sokolkin Ju.V., Tashkinov A.A. Mekhanika neuprugogo deformirovanija i razrushenija kompozicionnyh materialov / Pod red. Ju.V. Sokolkina. – М.: Nauka. Fizmatlit, 1997.
5. Kabantsev O. Modeling Nonlinear Deformation and Destruction Masonry under Biaxial Stresses. Part 1. Masonry as Simulation Object // Applied Mechanics and Materials. – 725...726, 2015. P. 681...696.
6. Kabantsev O. Modeling Nonlinear Deformation and Destruction Masonry under Biaxial Stresses. Part 2. Strength Criteria and Numerical Experiment // Applied Mechanics and Materials. – 725...726, 2015. P.808...819.
7. Popov N.N. Dinamicheskij raschet zhelezobetonnyh konstrukcij. – М.: СИ, 1974.
8. Popov N.N., Rastorguev B.S., Zabegaev A.V. Raschet konstrukcij na dinamicheskie i special'nye nagruzki. – М.: Vysshaja shkola, 1992.
9. Kabancev O.V., Gorbatov S.V., Pesin K.O. Ocenka vlijanija lokal'nyh defektov perekrytija na osnove ucheta pojetapnogo izmenenija raschetnoj shemy pod nagruzkoj // Vestnik Tomskogo gos. arhitekt.-stroit. un-ta. – 2015, №2. S.89...108.
10. Kolchunov V.I., Kljueva N.V., Androsova N.B., Buhtjarova A.S. Zhivuchest' zdaniy i sooruzhenij pri zaproektnyh vozdeystvijah. – М.: Izd-vo ASV, 2014.
11. Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns // Applied Mechanics and Materials. – Т. 475...476, 2014. P.1563...1566.
12. Almazov V.O., Khoj Kao Zuj. Dinamika progressirujushhego razrushenija mnogojetazhnyh karkasov. – М.: Izd-vo ASV, 2013.
13. Ljublinskij V.A., Tamrazjan A.G. Bezopasnost' nesushhih sistem mnogojetazhnyh zdaniy pri lokal'nom izmenenii zhestkostnyh harakteristik nesushhih jelementov // V sb.: Beton i zhelezobeton – vzgljad v budushhee / Nauchn. tr. III Vserossijskoj (II Mezhdunarodnoj) konf. po betonu i zhelezobetonu: V semi tomah. – 2014. S.90...99.
14. Cyganenko L.A. Osoblivosti rozruhanku visotnih budinkiv ne nesuchu zdatnist', stijkist' ta opir progressujuchomu obvaleniju // Vestnik Sumskogo nac. agrarn. un-ta (Ukraina). Serija "Stroitel'stvo". – 2012 g. Vyp. 5(16). S. 143..148.
15. Domarova E.V. Raschetno-konstruktivnye metody zashhity ot progressirujushhego obrushenija zhelezobetonnyh monolitnyh karkasnyh zdaniy // Vestnik IrGTU. – 2015, №10. S. 123...129.
16. Kabancev O.V. Nekotorye voprosy metodiki normirovanija raschetov zhelezobetonnyh konstrukcij vysotnyh zdaniy // Mezhdregional'naja obshhestvennaja organizacija "Sodejstvie razvitiyu i primeneniju prostranstvennyh konstrukcij v stroitel'stve" (Tez. dokl. nauchn. sessii). – М., 2009. S. 36...39.
17. Rudenko D.V., Rudenko V.V. Zashhita karkasnyh zdaniy ot progressirujushhego obrushenija // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. – 2009, №3. S.38...41.
18. Ashkenadze G.N., Sokolov M.E., Martynova L.D. i dr. Zhelezobetonnye steny sejsmostojkikh zdaniy. Issledovanija i osnovy proektirovanija / Pod red. G.N. Ashkenadze i M.E. Sokolova. – М.: Strojizdat, 1988.
19. Kupfer H.B. Das nichtlineare Verhalten des Betons bei zweiachsiger Beanspruchung // Beton und Stahlbetonbau. – №11, 1973. P. 269...273.
20. Geniev G.A. O linejnom predstavlenii uslovija prochnosti betona // Teorija i metody rascheta stroitel'nyh konstrukcij. CNIISK, vyp. 35. – М.: СИ. S.38...44.
21. Pособие по проектированию жилых зданий / ЦНИИЭП жилищна Госкомархитектуры. Вып. 3. Конструкции жилых зданий (к СНиП 2.08.01-85). – М.: СИ, 1989.
22. Kabancev O.V. Diskretnaja model' kamennoj kladki v uslovijah dvuhosnogo naprjazhennogo sostojanija // Vestnik Tomskogo gos. arhitekt.-stroit. un-ta. – 2015, №4. S.113...134.
23. Perel'muter A.V., Kabancev O.V. Analiz konstrukcij s izmenjajushhejsja raschetnoj shemoj. – М.: Izdatel'stvo SKAD SOFT, Izdatel'skij dom ASV, 2015.

Рекомендована Ученым советом МГСУ. Поступила 10.05.17.