



УДК 624.012



**КЛИМЕНКО Є.В.**  
Д-р технічних наук, проф.,  
проректор з наукової роботи,  
Одеська державна академія  
будівництва та архітектури,  
м. Одеса, Україна,  
e-mail: klimenkoew57@gmail.com,  
тел.: + 38 (067) 530-11-40,  
ORCID: 0000-0002-4502-8504



**АНТОНЮК Н.Р.**  
Канд. технічних наук, доц.,  
Одеська державна академія  
будівництва та архітектури,  
м. Одеса, Україна,  
e-mail: antonuk\_nr@ukr.net,  
тел.: + 38 (067) 489-06-96,  
ORCID: 0000-0003-1730-0723



**КОС Ж.**  
Аспірант, Одеська державна  
академія будівництва та  
архітектури,  
м. Одеса, Україна,  
e-mail: zeljko.kos@live.com,  
тел. + 38 (048) 723-20-95

## НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ СТИСНУТИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ПОШКОДЖЕНИХ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

### АНОТАЦІЯ

Залізобетонні конструкції мають цілу низку переваг, що сприяє їх широкому поширенню. У ході експлуатації конструкції та їх елементи піддаються зносу. Визначення технічного стану конструкцій в Україні регламентується національним стандартом і має описовий характер.

Авторами розроблено методологію визначення, прогнозування і регулювання технічного стану окремих конструкцій та будівель і споруд в цілому, що базується на апостеріорній інформації та нормативних методах розрахунку.

Метою даної роботи є встановлення впливу на залишкову несучу здатність пошкоджених залізобетонних колон прямокутного перерізу різної гнучкості таких факторів: глибина пошкодження, розташування фронту пошкодження відносно головних осей, гнучкість елемента тощо.

Для вирішення поставленого завдання було виконано планування експерименту. За оптимальним планом з 23 дослідних зразків із заздалегідь змодельованими пошкодженнями був проведений трьохфакторний трирівневий експеримент. Випробування натурних зразків проводили у спеціально розробленій установці. За результатами проведених випробувань описано деформований стан дослідних зразків та встановлено їх несучу здатність. Найбільший вплив на несучу здатність має кут відколу пошкодження в перерізі колони. Висота колони незначно впливає на підвищення руйнівної сили, а зі збільшенням висоти відколу відбувається зниження несучої здатності виробів.

Вплив на несучу здатність кута відколу є суттєвим. Зі збільшенням кута відколу до 60° руйнівна сила зростає до свого граничного значення. Вплив висоти відколу на руйнівну силу виробів протилежний. Зі збільшенням висоти відколу до 100 мм несуча здатність знижується до 30 тс.

Результати експериментів будуть використані при розробленні методики визначення залишкової несучої здатності залізобетонних колон різної гнучкості, пошкоджених при експлуатації.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** експериментально-статистичне моделювання, залізобетонні колони, пошкодження, несуча здатність.

### НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ПОВРЕЖДЕННЫХ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**КЛИМЕНКО Е.В.** Д-р технических наук, проф., проректор по научной работе, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса, Украина, e-mail: klimenkoew57@gmail.com, тел.: + 38 (067) 530-11-40, ORCID: 0000-0002-4502-8504

**АНТОНЮК Н.Р.** Канд. технических наук, доц., Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса, Украина, e-mail: antonuk\_nr@ukr.net,



тел.: + 38 (067) 489-06-96,  
ORCID: 0000-0003-1730-0723

**КОС Ж.** Аспирант, Одесская государственная академия строительства и архитектуры,  
г. Одесса, Украина,  
e-mail: zeljko.kos@live.com,  
тел.: +38 (048) 723-20-95

#### АННОТАЦИЯ

Железобетонные конструкции обладают целым рядом преимуществ, что способствовало их широкому распространению. В ходе эксплуатации конструкций и их элементы подвергаются износу. Определение технического состояния конструкций в Украине регламентируется национальным стандартом и имеет описательный характер.

Авторами разработана методология определения, прогнозирования и регулирования технического состояния отдельных конструкций и зданий и сооружений в целом, которая базируется на апостериорной информации и нормативных методах расчета.

Целью данной работы является установление влияния на остаточную несущую способность поврежденных железобетонных колонн прямоугольного сечения различной гибкости таких факторов: глубина повреждения, расположение фронта повреждения относительно главных осей, гибкость элемента.

Для решения поставленной задачи было выполнено планирование эксперимента. По оптимальному плану из 23 опытных образцов с заранее смоделированными повреждениями был проведен трёхфакторный трёхуровневый эксперимент. Испытание натуральных образцов проводили в специально разработанной установке. В результате проведенных исследований описано деформированное состояние опытных образцов и установлена их несущая способность. Наибольшее влияние на несущую способность оказывает угол откола повреждения в сечении колонны. Высота колонны незначительно влияет на повышение разрушающей силы, а вот с увеличением высоты откола происходит снижение несущей способности изделий.

Характер влияния на несущую способность угла откола весьма ощутим. С увеличением угла откола до 60° разрушающая сила возрастает до своего граничного значения. Влияние же высоты откола на разрушающую силу изделий противоположно. С увеличением высоты откола до 100 мм несущая способность снижается до 30 тс.

В дальнейшем результаты экспериментов будут использованы при разработке методики определения остаточной несущей способности железобетонных колонн различной гибкости, поврежденных в процессе эксплуатации.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** экспериментально-статистическое моделирование, железобетонные колонны, повреждение, несущая способность.

#### LOAD BEARING CAPACITY OF COMPRESSED REINFORCED CONCRETE ELEMENTS DAMAGED DURING OPERATION

**KLYMENKO Ye.V.** Dr., Prof., Vice-rector for scientific work, Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture,  
Odesa, Ukraine,  
e-mail: klimenkoew57@gmail.com,  
tel.: + 38 (067) 530-11-40,  
ORCID: 0000-0002-4502-8504

**ANTONIUK N.R.** PhD, Ass. Prof., Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture,  
Odesa, Ukraine,  
e-mail: antonuk\_nr@ukr.net,  
tel.: +38 (067) 489-06-96,  
ORCID: 0000-0003-1730-0723

**KOS Z.** PG student, Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture,  
Odesa, Ukraine,  
e-mail: zeljko.kos@live.com,  
tel.: +38 (048) 723-20-95

#### ABSTRACT

Reinforced concrete structures have a number of advantages, which contribute to the wide distribution of structures. The structures and their components are subject to wear in the course of operation. The definition of the technical condition of structures in Ukraine is regulated by the state standard and is descriptive.

A methodology for determining, forecasting and regulating the technical condition of individual structures and buildings and structures in general was developed by authors and is based on a posteriori information and normative methods of calculation.

The purpose of this work is to determine the degree of influence on the residual load-carrying capacity of damaged reinforced concrete columns of rectangular cross-section of various flexibility of the following various factors: the depth of damage, the location of the damage front relative to the main axes, the flexibility of the element.

To solve the task, the experiment was planned. According to the optimal plan, of 23 prototypes with pre-modeled damages, a 3-factor 3-level experiment was conducted. The testing of full-scale samples was carried out in a specially designed unit. As a result of the tests carried out, it was possible to describe the deformed state of the prototypes and establish their bearing capacity. The greatest influence on the load-carrying capacity is exerted by the angle of deflection in the cross section of the column. The height of the column slightly affects of the increase the destructive force, but with an increase in the height of the splitting, the bearing capacity of the products decreases.

The nature of the effect on the load-bearing capacity of the deflection angle is quite appreciable. With the increase



in the angle of separation up to  $60^\circ$ , the destructive force increases to its boundary value. The influence of the height of the splitting on the destructive force of the products is opposite. With an increase in the cut height up to 100 mm, the bearing capacity is reduced to 30 tons.

In the future, the results of the experiments will be used to develop a technique for determining the residual load-carrying capacity of reinforced concrete columns of various flexibility damaged during operation.

**KEY WORDS:** experimental statistical modeling, reinforced concrete columns, damage, bearing capacity

## ВВЕДЕНИЕ

Железобетонные конструкции обладают целым рядом преимуществ, таких как: высокая несущая способность, стойкость против воздействия агрессивной внешней среды, долговечность, относительно низкая стоимость (из-за применения местных строительных материалов). Эти качества способствовали широкому распространению конструкций и их элементов из бетона, армированного стальной арматурой. Однако, в ходе эксплуатации конструкции и их элементы подвергаются износу. Причиной износа, с одной стороны, есть снижение показателей эксплуатационной пригодности с течением времени. Скорость деградации конструкций в этом случае зависит от агрессивности внешней среды, способности материалов сопротивляться этому воздействию и эффективности применения специальных мероприятий (если таковы предусмотрены) по защите конструкций. С другой стороны, нагрузки в ходе эксплуатации могут отличаться от проектных. Ярким примером таких непроектных нагрузок есть воздействие на конструкции в ходе боевых действий, что особо актуально сейчас на востоке Украины. На рис. 1 показаны примеры разрушения железобетонных колонн от обоих видов воздействий (фото авторов).

Для определения возможности дальнейшей эксплуатации строительных конструкций, подвергшихся повреждению (частичному разрушению, не зависимо от его природы) необходимо иметь инструмент определения остаточной несущей способности таких элементов.

## АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Определение технического состояния отдельных конструкций, зданий и сооружений в целом в Украине регламентируется национальным стандартом [1]. Однако, этот документ имеет описательный характер и позволяет определять техническое состояние, базируясь на методе экспертных оценок.

В Одесской государственной академии строительства и архитектуры (ОГАСА) разработана методология определения, прогнозирования и регулирования технического состояния

отдельных конструкций и их систем (зданий и сооружений) [2]. Данная методология основывается на апостериорной информации и нормативных методах расчета по предельным состояниям и позволяет расчетным путем определять техническое состояние конструкций и по результатам принять решение о возможности дальнейшей эксплуатации или необходимости проведения работ по их усилению (повышению показателей эксплуатационной пригодности).

Одной из основных задач, решаемых в ходе определения технического состояния железобетонных конструкций, поврежденных в процессе эксплуатации, есть оценивание их остаточной несущей способности. Действующие нормы [3] не позволяют аналитическим путем решить эту задачу.

Проблемам определения несущей способности сжатых железобетонных элементов исследователями уделялось довольно много внимания [2, 4-8]. Однако, при частичном повреждении, а чаще всего, это разрушение части бетонного сечения на какой-то длине по высоте колонны, имеет место косое внецентренное сжатие.



а)

б)



в)

г)

**Рис. 1.** Виды повреждений железобетонных колонн: а, б – от воздействия внешней среды; в, г – от силового механического воздействия



Для случаев, когда к железобетонному элементу приложена сжимающая сила с эксцентриситетами относительно обеих главных осей сечения (косое внецентренное сжатие), аналитическое решение разработано довольно полно (для различных бетонов, классов арматуры, сечений, гибкости) в работах Торьяника М.С. и его учеников [4, 5].

В случае, когда на части высоты конструкции происходит повреждение колонны и фронт этого повреждения не параллелен ни одной из главных осей, также возникает косое внецентренное сжатие. Аналитические выражения для решения проблемы оценивания технического состояния (фактически, определения остаточной несущей способности поврежденных элементов) в литературе не представлены.

С целью восполнения этого пробела в теории железобетона на кафедре "Строительные конструкции" ОГАСА были проведены экспериментально-теоретические исследования [6–9]. В результате этого были разработаны основные предпосылки расчета, составлены уравнения равновесия для поврежденных бетонных и железобетонных колонн прямоугольного и круглого поперечного сечения. Достоверность результатов теоретических исследований подтверждается натурными экспериментами. Объектом указанных исследований были жесткие сжатые элементы, гибкость которых не могла существенно повлиять на их остаточную несущую способность.

гибкость при постоянных размерах неповрежденного сечения); угол откола  $\theta$  (рис. 2), градусы и высота откола  $h_1$ , (мм).

По оптимальному плану из 23 опытных образцов с заранее смоделированными повреждениями (при этом часть образцов были близнецами) проведен 3-х факторный эксперимент [9], в котором варьировали следующие величины:

$X_1$  - высота колонны  $h$  от 1 до 2,5 м;

$X_2$  - угол наклона фронта повреждения (откола),  $\theta$  от 0 до 60°;

$X_3$  - высота откола  $h_1$  от 20 до 100 мм.

Факторы стандартно нормализованы к  $-1 \leq x_i \leq +1$ . Уровни варьируемых факторов и матрица планирования эксперимента приведены в табл. 1.

Конструкция опытных образцов различной гибкости показана на рис. 3 – 5.

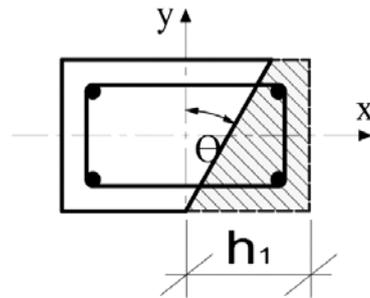


Рис. 2. Параметры поврежденного сечения

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данной работы является установление степени влияния на остаточную несущую способность поврежденных железобетонных колонн прямоугольного сечения различной гибкости следующих факторов: глубина повреждения, расположение фронта повреждения относительно главных осей неповрежденного сечения, гибкость элемента.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для решения поставленной задачи было выполнено планирование 3-х уровневое, 3-х факторного эксперимента [9].

Варьируемыми факторами были выбраны наиболее значимые (согласно выводов, сделанных на основании обзора литературных источников), а именно: высота колонны  $h$  (м) (относительная

Таблица 1. Уровни варьируемых факторов

№ п/п	Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
	Натуральный вид	Кодированный	-1	0	1	
1	Высота колонны ( $h$ ), м	$X_1$	1	1,75	2,5	0,75
2	Угол наклона фронта повреждения (откола) ( $\theta$ ), градусы	$X_2$	0	30	60	30
3	Высота откола ( $h_1$ ), мм	$X_3$	20	60	100	40

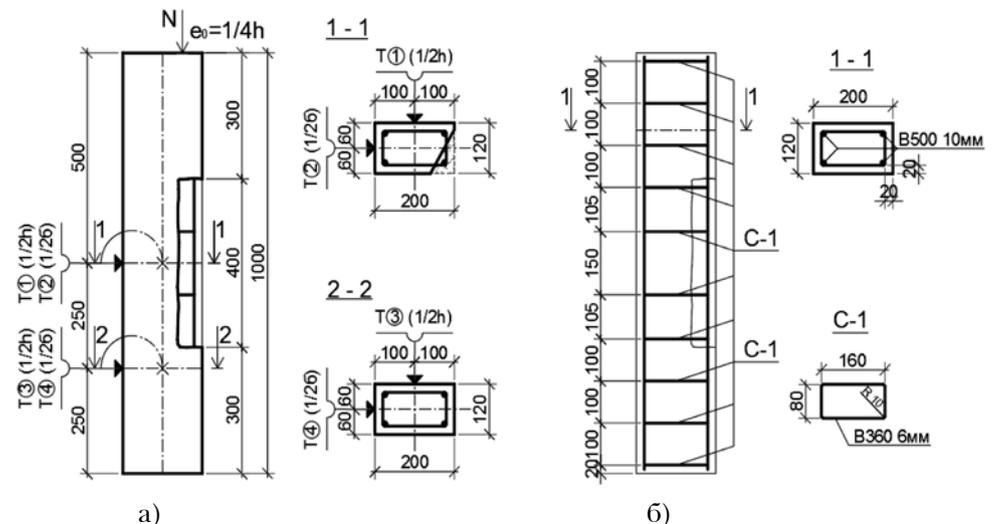


Рис. 3. Образцы малой гибкости: а - вид колонн; б - схема армирования

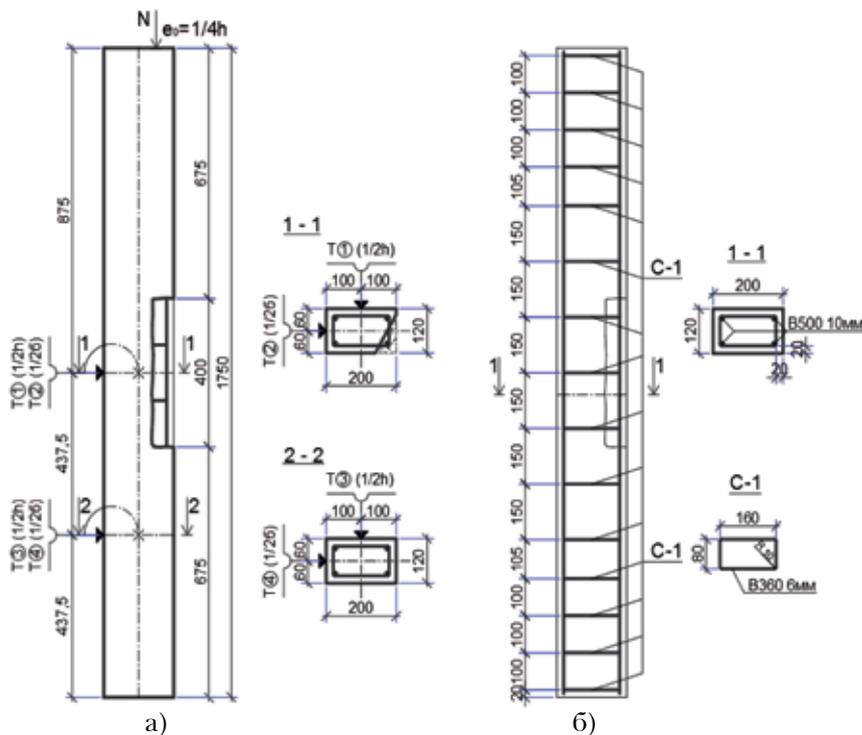


Рис. 4. Образцы малой гибкости: а - вид колонн; б - схема армирования

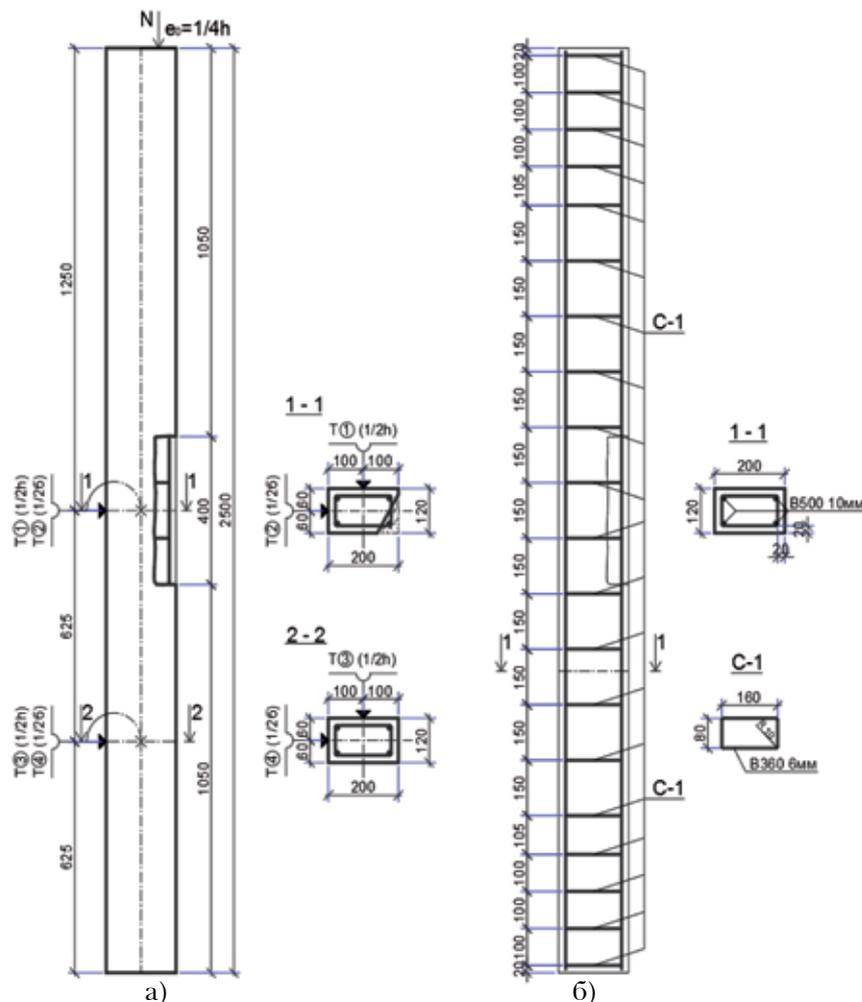


Рис. 5. Образцы большой гибкости: а - вид колонн; б - схема армирования

Испытание натуральных образцов проводили в специально разработанной установке (рис. 6). Силовозбудителем служила насосная станция, а перемещения измерялись посредством прогибометров.

В результате проведенных испытаний удалось описать деформированное состояние опытных образцов и установить их несущую способность.

По данным, которые были получены при испытании 23 опытных образцов, была построена 3-х факторная экспериментально-статистическая модель (ЭС-модель) разрушающей силы ( $P$ , тс) колонн:

$$P = 35,9 + 1,30x_1 \pm 0x_1^2 \pm 0x_1x_2 \pm 0x_1x_3 + 5,17x_2 - 2,24x_2^2 \pm 0x_2x_3 - 6,58x_3 - 2,49x_3^2. \quad (1)$$

Основными обобщающими показателями модели, в координатах экстремумов, для  $P$  являются: минимальный  $P_{min}=18,1$  тс ( $x_{min}$  при  $x_1=x_2=-1$ ,  $x_3=+1$ ) и максимальный  $P_{max}=44,2$  тс ( $x_{max}$  при  $x_1=x_2=+1$ ,  $x_3=-1$ ) уровни; абсолютный  $\Delta\{P\}=26,1$  тс и относительный  $\delta\{P\}=2,44$  перепад.

Как видно по оценкам ЭС-модели и однофакторным локальным полям (рис. 7), наибольшее влияние на несущую способность оказывает угол откола повреждения в сечении колонны. Высота колонны незначительно влияет на повышение разрушающей силы, а вот с увеличением высоты откола происходит снижение несущей способности изделий.

По данным ЭС-модели была построена диаграмма в виде куба, которая отображена на рис. 8. Её анализ показывает, что при увеличении высоты колонны с 1,0 м до 2,5 м разрушающая сила возрастает всего на 2 тс. При  $h = 1,0$  м  $P = 42$  тс, а при  $h = 2,5$  м  $P = 44$  тс.

Однако характер влияния на несущую способность угла откола весьма ощутим. С увеличением

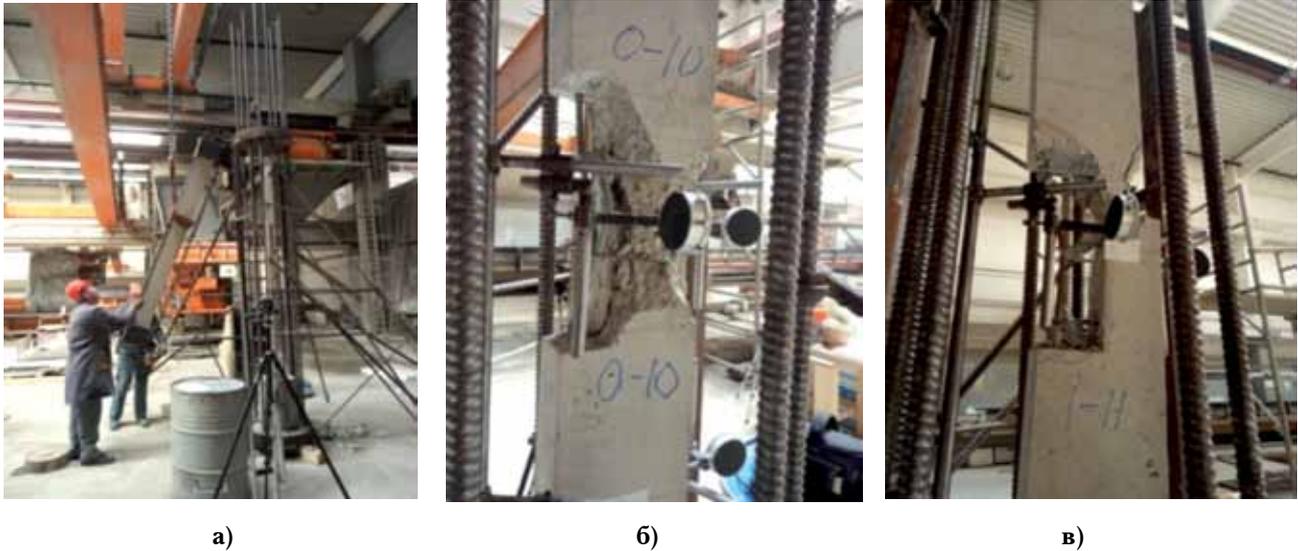


Рис. 6. Испытание опытных образцов: а - установка колонны в испытательную клетку; б - процесс испытания; в - разрушенный образец

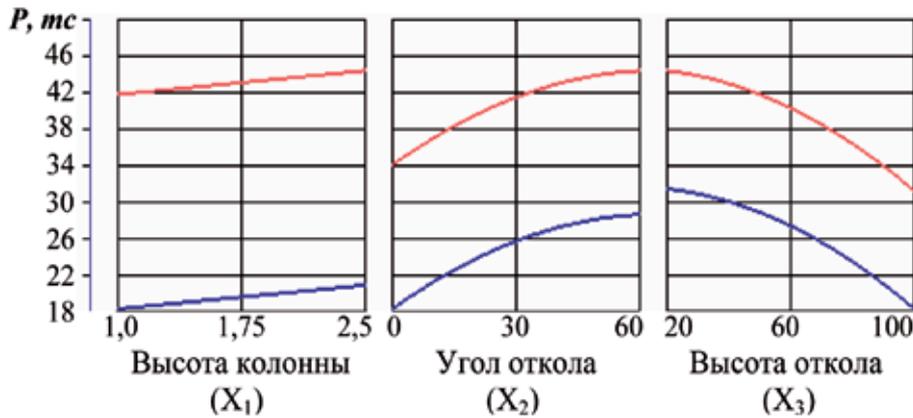


Рис. 7. Однофакторные зависимости влияния варьируемых факторов на разрушающую силу колонн

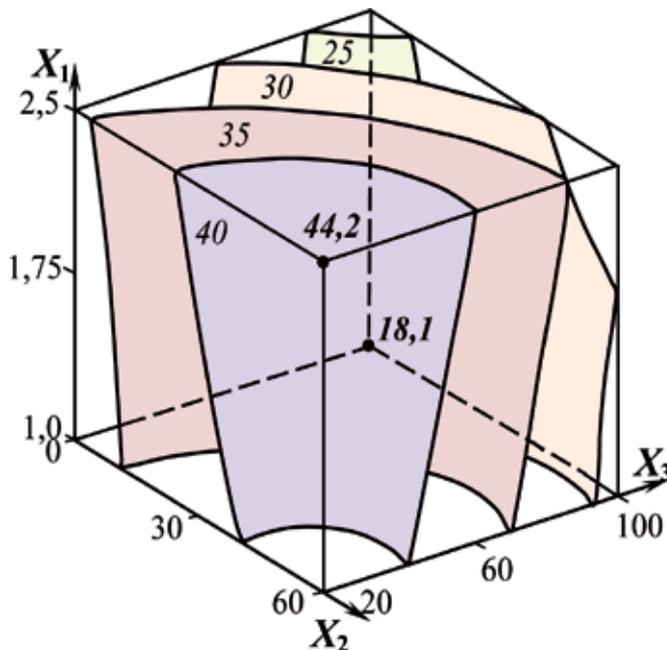


Рис. 8. Влияние варьируемых факторов на разрушающую силу колонн

угла откола до 60° разрушающая сила возрастает до своего граничного значения 44,2 тс при условии, что высота откола составит 20 мм при высоте колонны 2,5 м (рис. 8).

Влияние же высоты откола на разрушающую силу изделий совсем противоположно. С увеличением высоты откола до 100 мм несущая способность снижается до 30 тс.

### ВЫВОДЫ

В ходе проведенных исследований установлена остаточная несущая способность железобетонных колонн прямоугольного сечения, поврежденных в процессе эксплуатации.

В ходе экспериментально-статистического моделирования установлено, что наибольшее влияние на остаточную несущую способность имеет угол откола и глубина повреждения. Так, с увеличением угла откола до 60° разрушающая сила возрастает до своего граничного значения 44,2 тс при высоте откола 20 мм. С увеличением высоты откола до 100 мм несущая способность снижается до 30 тс. Высота колонны незначительно влияет на повышение разрушающей силы. При увели-



чений высоты колонны с 1,0 м до 2,5 м разрушающая сила возрастает всего на 2 тс. В дальнейшем результаты экспериментов будут использованы при разработке методики определения остаточной несущей способности железобетонных колонн различной гибкости, поврежденных в процессе эксплуатации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану: ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. – [Чинний від 2017–04–01]. – Київ: «УкрНДНЦ», 2017. – III, 45 с. – (Нац. стандарт України).
2. Клименко Є.В. Технічний стан будівель та споруд / Є.В. Клименко. – Одеса: ОДАБА; Умань: Уманське комунальне видавничо-поліграфічне підприємство, 2010. – 284 с.
3. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6-98:2009. – [Чинні від 2011–06–01]. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2011. – 71 с. – (Буд. норми України).
4. Торьяник М.С. Косое внецентренное сжатие и косой изгиб в железобетоне / М.С. Торьяник. – Киев: Госстройиздат УССР, 1961. – 156 с.
5. Торьяник М.С. Экспериментально-теоретические исследования обычных и предварительно напряженных железобетонных элементов при некоторых сложных деформациях / М.С. Торьяник, Л.В. Фалеев, Л.И. Сердюк // Строит. конструкции. – 1972. – Вып. 19. – С. 119-124.
6. Клименко Е.В. Поврежденные бетонные сжатые конструкции: работа, расчет / Е.В. Клименко, Г.М. Мустафа. – Одесса: ОНУ им. И.И. Мечникова, 2014. – 169 с.
7. Клименко Е.В. Работа поврежденных железобетонных колонн / Е.В. Клименко, Т.А. Крутько. – Одесса: ОГАСА, 2014. – 137 с.
8. Klymenko Ye.V., Orieshkovich M. & Kos Z. Approach to calculation of structural reliability and procedures for the evaluation of current state of construction // Вісн. ОДАБА. – Одеса: ОДАБА, 2015. – Вип. 61. – С. 176-185.
9. Вознесенский В.А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Б.Л. Огарков. – Киев: Вища школа, 1989. – 327 с.

#### REFERENCES

1. Nastanova shchodo obstezhennia budivel i sporud dlia vyznachennia ta otsinky yikh tekhnichnoho stanu [Guidelines for inspection of buildings and facilities for identification and evaluation of their technical condition]. (2017). DSTU-N B V.1.2-18:2016 from 1<sup>st</sup> April 2017. – K.: SE “UkrNDNC” [in Ukrainian].

2. Klymenko Ye.V. (2010). Tekhnichniy stan budivel ta sporud [Technical condition of buildings and structures]. - Odessa: ODABA; Uman: Umanske komunalne vyd.-polihrafichne pidpriemstvo [in Ukrainian].
3. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia [Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions]. (2011). DBN V.2.6-98:2009 from 1<sup>st</sup> June 2011. - K.: SE “Ukrarhbudininform” [in Ukrainian].
4. Torianik M.S. (1961). Kosoe vnetsentrennoe szhatie i kosoi izgib v zhelezobetone [Oblique eccentric compression and oblique bending in reinforced concrete]. – K.: Gosstroizdat USSR [in Russian].
5. Torianik M.S., Faleev L.V. & Serdiuk L.I. (1972). Eksperimentalno-teoreticheskie issledovaniia obychnykh i predvaritelno napriazhennykh zhelezobetonnykh elementov pri nekotorykh slozhnykh deformatsiakh [Experimental-theoretical studies of non-prestressed and prestressed reinforced concrete elements with some complex deformations]. Stroit. konstruktsii – Building constructions, 19, 119-124 [in Russian].
6. Klymenko Ye.V. & Mustafa G.M. (2014). Povrezhdennye betonnye szhatye konstruktsii: rabota, raschet [Damaged concrete compressed structures: behavior, calculation]. - Odessa: ONU n. a. I.I. Mechnikov [in Russian].
7. Klymenko Ye.V. & Krutko T.A. (2014). Rabota povrezhdennykh zhelezobetonnykh kolonn [Behavior of damaged reinforced concrete columns]. - Odessa: OGASA [in Russian].
8. Klymenko Ye.V., Orieshkovich M. & Kos Z. (2015). Approach to calculation of structural reliability and procedures for the evaluation of current state of construction. Visn. Odeskoi derzh. akad. bud-va ta arkhitektury – Her. of the Odessa State Acad. of Civil Engineering and Architecture, 61, 176-185. Odessa: ODABA [in English].
9. Voznesenskii V.A., Liashenko T.V. & Ogarov B.L. (1989). Chislennye metody resheniia stroitelno-tekhnologicheskikh zadach na EVM [Numerical methods for solving construction-technological problems on a computer]. – K.: Vyshcha shkola [in Russian].

Статья поступила в редакцию 15.08.2017 г.