

УДК 624.012

Г. Х. Масюк, И. И. Алексиевец

ВЛИЯНИЕ МАЛОЦИКЛОВЫХ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК НА ПРОЦЕССЫ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ВО ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

UDC 624.012

G. K. Masyuk, I. I. Aleksievets

THE IMPACT OF LOW-CYCLE ALTERNATING LOADS ON THE PROCESSES OF CRACK FORMATION IN ECCENTRICALLY COMPRESSED REINFORCED CONCRETE COMPONENTS

Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований работы внецентренно сжатых железобетонных элементов при действии малоцикловых нагрузок со знакопеременными эксцентриситетами и их влияние на трещинообразование.

Ключевые слова:

колонны, внецентренное сжатие, знакопеременные нагрузки, сжатие, сечение.

Abstract

The paper presents the results of the experimental research on the performance of eccentrically compressed reinforced concrete components under the action of low-cycle loads with alternating eccentricities and their impact on crack formation.

Key words:

columns, eccentric compression, alternating loads, compression, section.

Введение

На данном этапе развития теории железобетона и с внедрением новых нормативных документов по расчету конструкций широкое распространение получили полные диаграммы деформирования бетона, которые и используются для определения напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатых элементов конструкций. Однако влияние малоцикловых нагрузок со знакопеременными эксцентриситетами в этих расчетах не отражено, поэтому весьма актуально исследование воздействия малоцикловых знакопеременных нагрузок на изменение напряженно-деформированного состояния

внецентренно сжатых железобетонных элементов и предоставление рекомендаций по их расчету. Одним из этапов исследования таких элементов является определение влияния малоцикловых знакопеременных нагрузок на процессы трещинообразования в бетоне и ширины раскрытия трещин.

Методика экспериментальных исследований и конструкция испытываемых образцов

Объектом исследований были железобетонные колонны прямоугольного сечения с размерами 100×160×3000 мм (рис. 1 и 2). Рабочая арматура опытных образцов имела вид пространственного

каркаса с четырьмя стержнями диаметром 12 мм периодического профиля арматуры класса А400С, расположенными в углах сечения. Продольные стержни соединялись между собой с помощью хомутов. Поперечные хомуты выполнялись из отдельных стержней диаметром 4 мм из стали Вр-I, которые соединялись между собой контактно-точечной

сваркой в плоские каркасы и размещались с шагом 150 мм. Для предотвращения преждевременного разрушения торцов колонны они были усилены сетками косвенного армирования из стали Вр-I диаметром 4 мм, расположенными с шагом 50 мм. Всего было изготовлено 14 колонн.

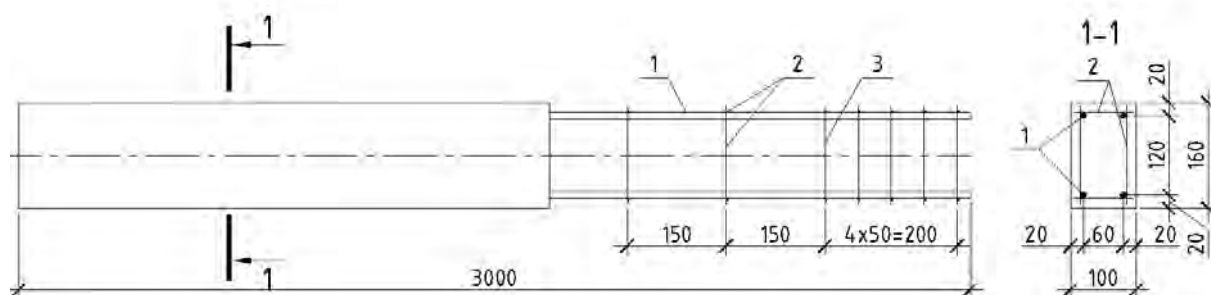


Рис. 1. Конструкция опытных образцов (колонн): 1 – рабочая арматура; 2 – поперечные стержни; 3 – сетки косвенного армирования



Рис. 2. Опытная колонна с измерительными приборами в установке для испытания

Испытания образцов проводились в специальной опытной установке (см. рис. 2), которая позволяла создавать знакопеременные нагрузки. Величина эксцентриситета приложения силы составляла $e_0 = \pm 10$ см. Деформации бетона и арматуры измерялись тензометрическими и механическими приборами.

Для определения уровней малоцикловой нагрузки две колонны были испытаны на одноразовую статическую нагрузку с доведением их до разрушения; остальные – на малоцикловые знакопеременные нагрузки в течение 10 циклов. Выдержка на каждом полуцикле нагрузки-разгрузки составляла 10 мин, на одиннадцатом цикле все колонны были доведены до разрушения.

Для образцов железобетонных колонн выбраны следующие режимы загрузки (рис. 3):

– испытание колонн 1К-1 и 2К-1 кратковременной нагрузкой для определения несущей способности N_c ;

– испытания двух колонн 1КЗН-2 малоцикловой нагрузкой со знакопеременным эксцентриситетом в режимах от $N_{сус} = 0,3N_c$ – на нижнем уровне до $N_{сус} = 0,6N_c$ – на верхнем в течение 10 циклов;

– испытания двух колонн 1КЗН-3 малоцикловой нагрузкой со знакопеременным эксцентриситетом в режимах от $N_{сус} = 0,3N_c$ – на нижнем уровне до $N_{сус} = 0,8N_c$ – на верхнем в течение 10 циклов;

– испытания двух колонн 1КЗН-4 малоцикловой нагрузкой со знакопеременным эксцентриситетом в режимах от $N_{сус} = 0,6N_c$ – на нижнем уровне до $N_{сус} = 0,8N_c$ – на верхнем в течение 10 циклов;

– испытания колонн 2КЗН-2 и 2КЗН-3 малоцикловой нагрузкой со знакопеременным эксцентриситетом в режимах от $N_{сус} = 0$ – на нижнем уровне, соответственно, к $N_{сус} = 0,65N_c$ и $N_{сус} = 0,85N_c$ на верхнем в течение 10 циклов;

– испытания двух колонн 2КЗН-4

малоцикловой нагрузкой со знакопеременным эксцентриситетом в режимах от $N_{сус} = 0$ – на нижнем уровне до $N_{сус} = 0,65N_c$ и $N_{сус} = 0,85N_c$ – на верхнем с очередностью через один цикл;

– испытания двух колонн 2КЗН-5 малоцикловой нагрузкой со знакопеременным эксцентриситетом в режимах от $N_{сус} = 0$ – на нижнем уровне до $N_{сус} = 0,1N_c \dots N_{сус} = 1,0N_c$ – на верхнем с приростом нагрузки на $0,1N_c$ на каждом цикле.

Результаты испытаний

На каждом этапе загрузки вместе с другой информацией фиксировалось образование трещин, а также глубина их проникновения и распространения. Поскольку цель работы непосредственно связана с изучением трещиностойкости внецентренно сжатых железобетонных элементов, большое внимание было уделено моменту образования трещин, глубине их проникновения и ширине раскрытия. Качественные параметры упомянутых величин, как и прогибов, достаточно тесно связаны с характером изменения продольных деформаций по длине элемента, поэтому особенности развития деформаций материалов и факторы, от которых они зависят, вполне могут быть отнесены и к закономерностям образования трещин.

Наличие в сечении растянутой зоны, а также достижение в ее крайних волокнах предела растяжения бетона – необходимые условия возникновения трещины.

При испытании внецентренно сжатых колонн 1К-1 и 2К-1 одноразовыми статическими нагрузками, наряду с нарастанием прогибов, которые были максимальными посередине образцов, начали появляться первые горизонтальные трещины в растянутой зоне. В момент разрушения колонн ширина раскрытия самой развитой трещины достигала почти 0,6 мм.

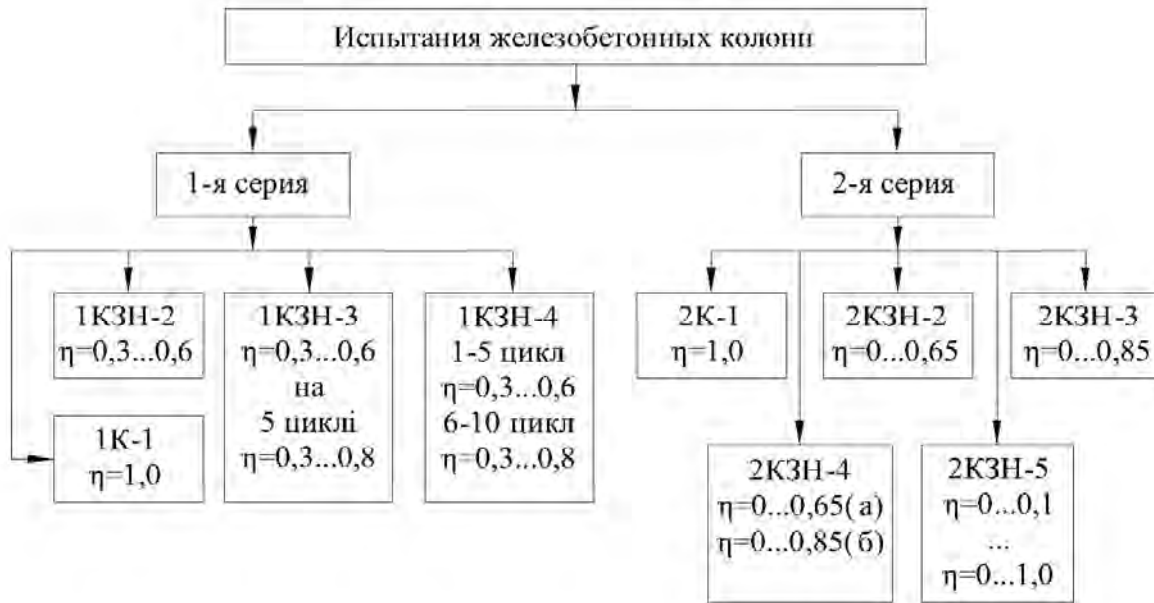


Рис. 3. Режимы испытания опытных образцов колонн

При испытании внецентренно сжатых железобетонных колонн малоцикловой нагрузкой проводилось наблюдение не только за появлением трещин, но и за их развитием. С возникновением первых трещин в растянутой зоне прирост деформаций значительно возрастал. Момент образования трещин определялся с помощью тензорезисторов, наклеенных на растянутой грани колонны, а также визуально с использованием ацетона. Смочив поверхность растянутой грани бетонного образца ацетоном, в момент появления трещины хорошо видно ее очертание. Попадая в микротрещину, он оставляет четкий след по всей ее длине. Такой способ позволил визуально определять момент возникновения трещин на две-три ступени раньше, чем невооруженным глазом.

Более точно момент появления трещин определялся с помощью тензорезисторов. К моменту образования микротрещин увеличение деформаций тензорезисторов на каждой ступени нагрузки было почти одинаковым, что свидетельствует о сравнительно равно-

мерном растяжении бетона. В момент появления трещин тензорезистор, через который они проходили, показывал резкое увеличение деформации растяжения, а соседние тензорезисторы – увеличение деформаций противоположного знака. Первые трещины в растянутой зоне бетона возникали, как правило, в средней трети образца. С ростом нагрузки происходило углубление и раскрытие этих трещин, между ними образовывались новые трещины, которые быстро развивались. Незадолго до пятого-шестого циклов малоциклового нагружения процесс трещинообразования практически угасал, хотя глубина проникновения нормальных трещин увеличивалась.

Первые микротрещины во всех колоннах, которые испытывались на малоцикловые знакопеременные нагрузки, появлялись уже на первых циклах загрузки при уровнях 0,2...0,3 от разрушительного (рис. 4). Можно констатировать, что на первом цикле загрузки колонн первой серии часть трещин остались раскрытыми в результате неполного снятия нагрузок и раздроб-

ления бетона в зоне трещин, что и мешало их закрытию.

Расстояние между трещинами в местах их скопления колебалось в пределах 5...8 см и фиксировалось практически от опоры к опоре, к тому же ин-

тервал между смежными трещинами для всех колонн был примерно одного значения, а глубина их проникновения уменьшалась от середины элементов к опорам.

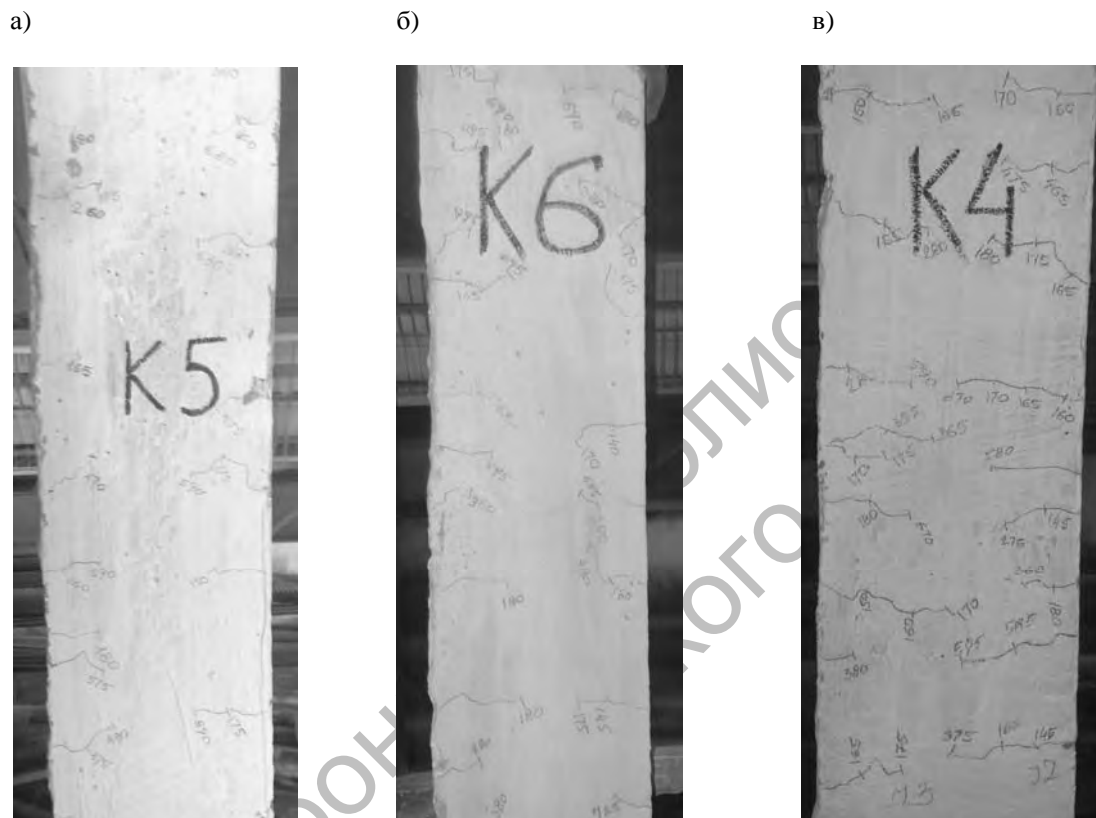


Рис. 4. Развитие трещин и характер выкалывания бетона в колоннах марок: а – 1КЗН-3; б – 2КЗН-3; в – 2КЗН-4

Экспериментально было установлено, что появление новых, увеличение и раскрытие уже существующих трещин наблюдалось за первые пять–шесть циклов малоциклового нагружения колонн марок 1КЗН-2, 1КЗН-3, 1КЗН-4, 2КЗН-2, 2КЗН-3, 2КЗН-4, а в дальнейшем проходила их стабилизация.

В частности, в колоннах марки 1КЗН-3, которые испытывались на малоцикловые нагрузки в режиме $\eta = 0,3...0,6$ с догрузкой на пятом цикле к $\eta = 0,8$, ширина раскрытия самой большой трещины на верхнем уровне

пятого цикла составляла $w_k = 0,24$ мм (рис. 5).

На шестом цикле при снижении нагрузки до уровня, соответствующего $\eta = 0,6$, ширина раскрытия составляла $w_k = 0,17$ мм и стабилизировалась на последующих циклах, т. е. после шестого цикла процесс трещинообразования практически завершился (см. рис. 5). В общем, на верхнем уровне прирост ширины раскрытия трещин между десятым и шестым циклами составил 63,6 %, на нижних уровнях – 66,7 %.



Рис. 5. Развитие ширины раскрытия трещин в колоннах марки 1КЗН-3

В табл. 1 приведены результаты величины ширины раскрытия наиболее опасной трещины на верхних уровнях малоцикловых знакопеременных нагрузок по всем колоннам. Как прогнозировалось, что и видно из результатов испытания, существенное раскрытие трещин практически во всех колоннах наблюда-

лось до пятого–шестого циклов, после чего возникала определенная стабилизация. В колоннах марки 2КЗН-5 раскрытие трещин на циклах загрузки происходило по линейным зависимостям, поскольку нагрузка проводилась равными ступенями до полного разрушения элементов.

Табл. 1. Ширина раскрытия наиболее опасной трещины на верхних уровнях по циклам малоцикловой нагрузки

Марка колонн	Ширина раскрытия трещин на циклах w_k , мм										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1К-1	0,6 (при разрушении)										
1КЗН-2	0,09	0,11	0,13	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,41
1КЗН-3	0,1	0,12	0,14	0,16	0,24	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,39
1КЗН-4	0,1	0,11	0,13	0,13	0,15	0,22	0,23	0,23	0,24	0,25	0,44
2К-1	0,57 (при разрушении)										
2КЗН-2	0,11	0,13	0,13	0,16	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,38
2КЗН-3	0,14	0,17	0,19	0,21	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,45
2КЗН-4	0,1	0,18	0,1	0,2	0,11	0,25	0,12	0,25	0,12	0,25	0,44
2КЗН-5	–	–	0,06	0,08	0,1	0,15	0,19	0,26	0,34	0,45	0,50

Если анализировать рис. 4, то можно заметить, что проникновение трещин во всех колоннах без исключения максимально глубоко происходило

в середине сечения колонны, т. е. максимальная длина трещин в наиболее опасном сечении, посередине колонны, составляла 10...12 см, а с приближени-

ем к опорам уменьшалась.

Практически во всех колоннах в стадии разрушения наблюдалось пластичное выкалывание сжатого бетона (образование лещаток). Многие исследователи, в частности, В. И. Бабич, А. Н. Бамбура, связывают это явление с работой нисходящей ветки диаграммы напряжений. В свою очередь возникновение лещаток свидетельствует о разрушении сжатой зоны бетона. Таким образом происходит как бы разрушение части сжатой зоны бетона, т. е. выключение его из работы, хотя это проходит без разрушения самого образца.

Процесс образования трещин вполне аналогичен описанному исследователями Ю. В. Гарницким, Л. Н. Геништою, В. И. Клименком, В. И. Мурашовым. Сначала возникает трещина в месте максимального изгибающего момента. С увеличением нагрузки она начинает развиваться вместе с образованием новых трещин по длине образца. Появление новых трещин происходит до определенного момента, после чего начинает раскрываться наиболее опасная трещина одновременно с образованием лещаток в сжатой зоне. В таком состоянии дальнейшее незначительное увеличение нагрузки или выдержка под нагрузкой приводят к разрушению.

Для сравнения ширины раскрытия

экспериментально зафиксированных трещин определим их ширину раскрытия по действующим нормативным документам.

Согласно [1, 2] ширину раскрытия трещин определяем по выражению

$$w_k = s_{r,\max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}), \quad (1)$$

где $s_{r,\max}$ – максимальный шаг трещин; ε_{sm} – средние деформации в арматуре; ε_{cm} – средние деформации бетона между трещинами.

Ширина раскрытия трещин ограничивается действующими нормативными документами с учетом функционального характера конструкций и их эстетического вида. Рекомендуемые величины ширины раскрытия w_{\max} зависят от условий окружающей среды, в которых осуществляется эксплуатация конструкций, и минимального класса бетона по прочности на сжатие. Для нашего случая [2, табл. 5.1] $w_{\max} = 0,3$ мм.

Результаты сравнения нормативных и экспериментальных значений ширины раскрытия трещин приведены в табл. 2.

Табл. 2. Сравнение нормативных и экспериментальных значений ширины раскрытия трещин

Марка колонны	Режим нагрузки	$w_{k, \text{экс}}$, мм	w_k , мм [1]	w_{\max} , мм	$w_{k, \text{экс}} / w_k$, %
1КЗН-2	0,3...0,6	0,16	0,11	0,3	45,5
1КЗН-3	0,3...0,6 0,3...0,8 (5 цикл)	0,17			54,5
1КЗН-4	0,3...0,6 (1...5 циклы) 0,3...0,8 (6...10 циклы)	0,22			100
2КЗН-2	0...0,65	0,18	0,11	0,3	63,6
2КЗН-3	0...0,85	0,24			118,2
2КЗН-4	0...0,65 (а) 0...0,85 (б)	0,25			127,3
2КЗН-5	От 0...0,1 до 0...1,0	0,19			72,7

Здесь значения ширины раскрытия трещин, определенных экспериментально, занесены с шестого цикла малоциклового знакопеременной нагрузки, а для колонны 2КЗН-5 значение седьмого цикла соответствует эксплуатационному уровню.

Как видно из табл. 2, малоцикловые знакопеременные нагрузки существенно влияют на ширину раскрытия трещин во внецентренно сжатых железобетонных элементах. В частности, при уровнях нагрузок, которые не превышают или близкие к эксплуатационным уровням $\eta = 0,6...0,65$, ширина раскрытия трещин увеличивается на 45,5...63,6 %. При более высоких уровнях нагрузок, до $\eta = 0,85$, ширина раскрытия трещин увеличивается практически в 2 раза и составляет 100...127,3 %, по сравнению с шириной раскрытия трещин, определяемых по нормативным документам [1, 2]. Однако следует отметить, что во всех случаях ширина раскрытия трещин не превышает их пре-

дельных значений. Превышение происходило в момент, близкий к разрушению, при догрузке колонн на одиннадцатом цикле загрузки.

Анализируя полученные экспериментальные данные, можно утверждать, что влияние малоцикловых знакопеременных нагрузок на ширину раскрытия трещин нужно учитывать с коэффициентом $\gamma_{w,cyc}$, который будет отражать реальную работу конструкций при таких видах нагрузки. Тогда формулу (1) можно представить в виде

$$w_k = \gamma_{w,cyc} S_{r,max} (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}). \quad (2)$$

Для экспериментальных внецентренно сжатых элементов коэффициент следует принимать: при нагрузках на верхних уровнях $\eta = 0,6...0,65$ $\gamma_{w,cyc} = 1,6$; при $\eta = 0,8...0,85$ $\gamma_{w,cyc} = 2,0$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкция зданий и сооружений. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – Киев : Минрегионстрой Украины, 2011. – 71 с.
2. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонные и железобетонные конструкции из тяжелого бетона. Правила проектирования. – Киев : Минрегионстрой Украины, 2011. – 118 с.
3. Масюк, Г. Х. Расчет прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов при действии малоцикловых нагрузок с знакопеременными эксцентриситетами с применением деформационной модели / Г. Х. Масюк // Ресурсосберегающие материалы, строительные конструкции, здания и сооружения : сб. науч. тр. – Ривне : НУВХП, 2013. – Вып. 25. – С. 330–335.
4. Бабич, Е. М. Бетонные и железобетонные элементы в условиях малоцикловых нагрузок : монография / Е. М. Бабич, Ю. А. Крусь. – Ривне : Ровен. гос. техн. ун-т, 1999. – 119 с.

Статья сдана в редакцию 10 января 2014 года

Григорий Харитонович Масюк, канд. техн. наук, проф., Национальный университет водного хозяйства и природопользования. E-mail: gmasyuk@mail.ua.

Иван Иванович Алексиевец, ассистент, Национальный университет водного хозяйства и природопользования. E-mail: ivanalekseevec@rambler.ru.

Grigory Kharitonovich Masyuk, PhD (Engineering), Prof., National University of Water Management and Nature Resources Use. E-mail: gmasyuk@mail.ua

Ivan Ivanovich Aleksievets, assistant lecturer, National University of Water Management and Nature Resources Use. E-mail: ivanalekseevec@rambler.ru.