

УДК 624.075.23

**ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТА
НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТРУБОБЕТОННЫХ КОЛОНН**

**PRACTICAL IMPLEMENTATION OF THE CALCULATION
OF THE BEARING CAPACITY TRUMPET-CONCRETE COLUMN**

А.Л. КРИШАН, В.И. РИМШИН, В.И. ТЕЛИЧЕНКО, В.А. РАХМАНОВ, М.Ю. НАРКЕВИЧ
A.L. KRISHAN, V.I. RIMSHIN, V.I. TELICHENKO, V.A. RAKHMANOV, M.YU. NARKEVICH

(Магнитогорский государственный технический университет,
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
АО "ВНИИЖелезобетон")

(Magnitogorsk State Technical University,
National Research Moscow State University of Civil Engineering,
JSC "VNIJzhbeton")

E-mail: kris_al@mail.ru; v.rimshin@vniizhbeton.ru; l.kuzmina@plehanova7.ru;
skyjanny@mail.ru; kurbatov_bgtu@list.ru

Приведены результаты сопоставления значений теоретических и опытных разрушающих нагрузок, выполненных для 110 центрально сжатых и 72 внецентренно сжатых образцов трубобетонных колонн круглого поперечного сечения. Предложенная методика позволяет достоверно оценивать их напряженно-деформированное состояние на любом уровне загрузки. Методика приемлема для колонн, изготовленных по разным технологиям из бетонов различной прочности и вида используемых при реконструкции предприятий текстильной промышленности.

The results of comparing the values of theoretical and experimental failure loads performed for 110 and 72 centrally compressed eccentrically compressed concrete filled steel tube columns of circular cross-section of samples. The proposed method can reliably evaluate their stress-strain state at any level-of uploaded. The technique is acceptable for pipe-concrete columns, made by different techniques of concrete with different strength and appearance used in the reconstruction of the textile industry enterprises.

Ключевые слова: трубобетонные колонны, несущая способность, объемное напряженное состояние, нелинейная деформационная модель, текстильная промышленность.

Keywords: concrete filled steel tube columns, bearing capacity, triaxial stress state, nonlinear deformation model, of the textile industry enterprises.

В последние годы у строителей существенно вырос интерес к трубобетонным колоннам. Данное обстоятельство объясняется многочисленными достоинствами этих конструкций [1]. При проектировании многоэтажных зданий текстильной промышленности с увеличенной сеткой таких колонн можно получить ощутимый экономический эффект [2], [22].

Однако широкое практическое использование трубобетонных колонн сдерживается отсутствием надежных методик расчета, адекватно оценивающих особенности их силового сопротивления. Современные предложения по расчету несущей способности сжатых трубобетонных элементов [3...12] в своей основе имеют эмпирические зависимости. Поэтому каждая из них имеет ограниченную область применения. В связи с этим возникла необходимость в разработке универсальной методики расчета, основанной на использовании нелинейной деформационной модели и теоретических положениях механики твердого тела.

Рассмотрим расчет прочности короткой внецентренно сжатой колонны круглого поперечного сечения. На первом этапе расчетным путем строятся диаграммы деформирования бетонного ядра и стальной оболочки. Практическая реализация данного этапа заключается в постепенном увеличении с малым шагом $\Delta \epsilon_{pz} = \Delta \epsilon_{bz}$ относительных осевых деформаций укорочения стальной оболочки и бетонного ядра короткой центрально сжатой колонны. На каждом шаге необходимые параметры диаграмм деформирования рассчитываются из совместного решения систем уравнений, представляющих собой физические соотношения между напряжениями и деформациями в форме обобщенного закона Гука. При этом бетон рассматривается как трансверсально изотропный материал, а стальная оболочка – как изотропный.

Связь между деформациями и напряжениями для любой точки внешней стальной оболочки выражается системой уравнений:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{pz} \\ \epsilon_{pt} \\ \epsilon_{pr} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\nu_p E_{s,p}} \begin{bmatrix} 1 & -\nu_p & -\nu_p \\ -\nu_p & 1 & -\nu_p \\ -\nu_p & -\nu_p & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{pz} \\ \sigma_{pt} \\ \sigma_{pr} \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

В системе (1) σ_{pz} , σ_{pt} , σ_{pr} – нормальные (главные) напряжения в трубе в осевом, тангенциальном и радиальном направлениях; ϵ_{pz} , ϵ_{pt} , ϵ_{pr} – относительные деформации стальной оболочки по соответствующим направлениям; $E_{s,p}$ – начальный модуль упругости стали; ν_p – коэффициент упругости стали; ν_p – коэффициент поперечной деформации стали трубы.

Основываясь на экспериментальных данных (направление линий Чернова-Людерса на поверхности стальной трубы), напряжения и деформации здесь приняты действующими по главным площадкам, то есть касательные напряжения и сдвиговые деформации равны нулю.

Для производства стальных труб в РФ в основном используются трубы из "мягких" сталей, имеющих площадку текучести. Поэтому диаграмма деформирования стали принимается двухлинейной.

В предлагаемой методике нелинейного расчета с целью исключения одновременного применения двух итераций неупругие свойства стали рекомендуется учитывать с помощью одного переменного параметра – коэффициента упругости ν_p , по которому определяется значение коэффициента поперечных деформаций ν_p .

Для вычисления коэффициента ν_p предлагается формула [13]:

$$\nu_p = 0,48 - (0,48 - \nu_0) \left(\frac{\nu_p - \nu_{pu}}{\nu_{po} - \nu_{pu}} \right), \quad (2)$$

в которой ν_0 – коэффициент Пуассона для стали трубы; ν_{pu} – коэффициент упругости в конце площадки текучести.

Система уравнений, описывающих связь между напряжениями и деформациями для любой точки трансверсально-изотропного бетонного ядра в упругой и упруго-пластической стадиях, имеет вид:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{bz} \\ \varepsilon_{br} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E_b} \begin{bmatrix} \nu_{bz}^{-1} & -2\nu_{zr}\nu_{bi}^{-1} \\ -\nu_{zr}\nu_{bi}^{-1} & (\nu_{br}^{-1} - \nu_{pr}\nu_{bi}^{-1}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{bz} \\ \sigma_{br} \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

где E_b – начальный модуль упругости бетона.

Значение E_b для практических расчетов удобно вычислять по одной из формул, предложенных в работе [14].

Учет неупругих свойств объемно сжатого бетонного ядра производится путем использования переменных коэффициентов упругости ν_{bj} ($j = z, r, i$) и поперечной деформации ν_{zr} , ν_{pr} бетона. Причем коэффициент упругости с индексом $j=i$ определяется в зависимости от интенсивности напряжений и интенсивности деформаций в бетоне.

Так как рост напряжений σ_{bz} и σ_{br} в процессе нагружения происходит не пропорционально (сложный режим нагружения), коэффициенты упругости для разных направлений имеют различные значения. Для их вычисления можно принимать любые известные зависимости, обеспечивающие достаточную точность оценки напряженно-деформированного состояния конструкции, например, предложенную в работе [15].

Для определения текущих значений коэффициентов поперечных деформаций ν_{jr} ($j = z, r$) предлагается формула [13]:

$$\nu_{jr} = \nu_{jru} - (\nu_{jru} - \nu_b) \left(\frac{\nu_{bi} - \nu_{biu}}{\nu_{oj} - \nu_{biu}} \right)^{0,5}, \quad (4)$$

в которой $\nu_b = 0,18 \dots 0,25$ – коэффициент Пуассона для бетона (при отсутствии точных данных рекомендуется принимать $\nu_b = 0,2$); ν_{jru} – предельное значение коэффициента поперечной деформации ν_{jr} , определяемое по рекомендациям работы [15].

Из решения систем уравнений (1) и (3), уравнений совместности деформирования бетона и стали в осевом и трансверсальном направлениях, с учетом условий равновесия элемента получаем формулу для определения бокового давления на каждом шаге наращивания относительных осевых деформаций:

$$\sigma_{br} = \frac{\left(\nu_p - \beta_r \nu_{zr} \frac{\nu_{bz}}{\nu_{bi}} \right) \varepsilon_{bz}}{K_p + K_b}, \quad (5)$$

где параметры K_p и K_b вычисляются по формулам, приведенным в работе [1].

При известной величине σ_{br} из решения систем (1) и (3) вычисляют напряжения σ_{bz} , σ_{pz} , после чего происходит дальнейшее наращивание относительных осевых деформаций бетонного ядра ε_{bz} . Расчет выполняют до достижения напряжениями σ_{bz} предварительно найденной прочности объемно сжатого бетона R_{bz} [16].

После этого уточняют соответствие последнего значения относительной деформации ε_{bz} предварительно вычисленной деформации в вершине диаграммы деформирования бетона ε_{b00} [17]. При величине невязки больше заданной расчетчиком $|\varepsilon_{bz} - \varepsilon_{b00}| > \Delta_\varepsilon$ уточняют значение ε_{b00} и все расчеты повторяют.

На втором этапе расчета определяется несущая способность колонны. Расчетная схема нормального сечения, внецентренно сжатого трубобетонного элемента, изображена на рис. 1.

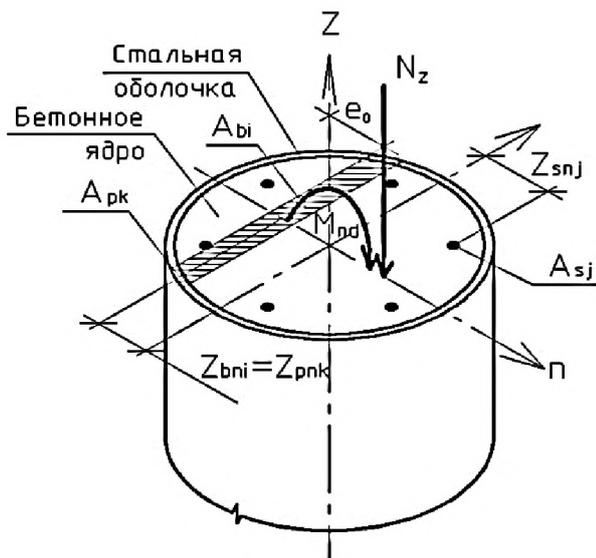


Рис. 1

Переход от эпюры напряжений в бетоне, стальной обойме и стержневой арматуры (при наличии) к обобщенным внутренним усилиям производят с использованием процедуры численного интегрирования напряжений по нормальному сечению. Для этого нормальное сечение условно разбивают на малые участки с площадями бетона $A_{би}$, стальной оболочки $A_{рк}$ и стержневой арматуры A_{sj} . Начало координат можно совмещать с геометрическим центром поперечного сечения. Эпюра деформаций принимается соответствующей гипотезе Бернулли. Используя результаты первого этапа, для каждой из соответствующих деформаций в центре рассматриваемого участка определяются напряжения в бетоне и стали. В пределах каждого участка напряжения принимают равномерно распределенными (усредненными).

Суть расчета сводится к построению эпюры относительных деформаций нормального сечения, соответствующей стадии предельного равновесия рассчитываемого элемента. Построение такой эпюры осуществляется в следующей последовательности.

Принимается достаточно малое значение относительной деформации равномерного сжатия конструкции. Затем осуществляется пошаговая трансформация эпюры относительных деформаций от прямо-

угольной до искомой трапециевидной, отвечающей условию равновесия внецентренно сжатого элемента. Находят соответствующие продольное усилие и изгибающий момент. Далее пошагово наращивается деформация со стороны наиболее сжатого волокна, и вся процедура повторяется. Разрушающая нагрузка соответствует максимальной величине найденных таким образом продольных усилий.

Для реализации предложенной методики расчета разработана компьютерная программа, с помощью которой были определены теоретические разрушающие нагрузки N_u для трубобетонных элементов, испытанных ранее на центральное и внецентренное сжатие. Исходные данные для расчетов принимались по материалам публикаций наиболее известных в СССР и РФ научных школ в области исследования трубобетонных колонн, возглавляемых Л.И. Стороженко [18], И.Г. Людковским [19], А.Л. Кришаном и В.И. Римшиным [1], [20], [21], а также экспериментов японских ученых [2].

Для большей наглядности и объективности проводимого сопоставления теории и практики трубобетонные элементы принимались с самыми различными геометрическими и конструктивными параметрами:

- наружным диаметром внешней стальной оболочки от 93 до 1020 мм;
- толщиной стенки внешней стальной оболочки от 0,8 до 13,3 мм;
- пределом текучести стали оболочки от 240 до 440 МПа;
- призменной прочностью бетона от 11,7 до 104 МПа;
- относительными эксцентриситетами сжимающей нагрузки от 0 до 1.

Сопоставление теоретических и опытных значений разрушающих нагрузок выполнено для 110 центрально сжатых и 72 внецентренно сжатых образцов колонн. Результаты свидетельствуют об их удовлетворительном совпадении: для центрально сжатых образцов наибольшие расхождения составляют +17...-9 % при величине коэффициента вариации вектора ошибок $V_{\delta} = 0,04$; для внецентренно сжатых образцов наибольшие расхождения составили +18...-14 % при $V_{\delta} = 0,08$. Расчеты по методике евро-

пейских норм (EN 1994-1-1) дают при осевом сжатии $V_8 = 0,13$ и максимальные расхождения +42...-19 %, а при внецентренном сжатии заметны большие расхождения. Преимущества предлагаемой методики очевидны.

ВЫВОДЫ

Разработанная методика расчета несущей способности внецентренно сжатой трубобетонной колонны основана на использовании нелинейной деформационной модели, учитывает объемное напряженно-деформированное состояние и совместную работу бетонного ядра и стальной оболочки. Она позволяет достоверно оценивать напряженно-деформированное состояние колонн на любом уровне нагружения, что полезно для практики проектирования новых и реконструкции действующих предприятий текстильной промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кришан А.Л. Трубобетонные колонны с предварительно обжатым бетонным ядром. – Ростов-на-Дону: Рост. гос. строит. ун-т, 2011.
2. Nishiyama I., Morino S., Sakino K., Nakahara H. Summary of Research on Concrete-Filled Structural Steel Tube Column System Carried Out Under The US-JAPAN Cooperative Research Program on Composite and Hybrid Structures. – Japan, 2002.
3. Baig M.N., Fan J., Nie J. Strength of Concrete-Filled Steel Tubular Columns // Journal of Tsinghua Science and Tehnology. – 11 (6), 2006. P. 657...666.
4. Georgios G. and Lam D. Axial capacity of circular concrete-filled tube columns // Journal of Constructional Steel Research. – 60, 2004. P. 1049...1068.
5. Fattah A.M. Behaviour of concrete columns under various confinement effects: A dissertation doctor of philosophy. – Kansas, USA: Kansas State University, 2012.
6. Masoudnia R., Amiri S., WanBadaruzzaman W.H. An Analytical model of short steel box columns with concrete in-fill (part I) // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. – № 5, 2011. P.1715...1721.
7. Tao Z., Uy B., Han L.H., He H.S. Design of concrete-filled steel tubular members according to the Australian Standard AS 5100 model and calibration // Australian Journal of Structural Engineering. – №8(3), 2008. P. 197...214.
8. Tsuda K., Matsui C., Fujinaga T. Simplified Design Formula of Slender Concrete-Filled Steel Tubular

Beam-Columns. In the Proceedings 6th ASCCS Conference on Composite and Hybrid Structures. – Los Angeles, 2000. P. 457...464.

9. Wey Y.Y., Wu Y.F. Unified stress-strain model of concrete for FRP confined columns // Construction Building Materials. – Vol. 26, № 1, 2012. P. 381...392.
10. Yang Y.F., Han L.H. Behavior of concrete-filled steel tubular (CFST) stub columns under eccentric partial compression // Thin-Walled Structures. – Vol. 49, №2, 2011. P. 379...395.
11. Yu T., Teng J.G. Behavior of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns with a square outer tube and a circular inner tube subjected to axial compression // Journal of Composites for Construction. – Vol. 17, 2013. P. 271...279.
12. Zaghi A.E., Saidi M., Mirmiran A. Shake table response and analysis of a concrete-filled FRP tube bridge column // Composite structures, Elsevier. – Vol. 94, № 5, 2012. P. 1564...1574.
13. Кришан А.Л., Заикин А.И. Расчет прочности трубобетонных колонн // Бетон и железобетон. – 2011, № 3. С.17...19.
14. Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А., Наркевич М.Ю. Определение деформационных характеристик бетона // Естественные и технические науки. – 2014, № 9-10 (77). С. 367...369.
15. Модель деформирования железобетона в пирашениях и расчет балок-стенок и изгибаемых плит с трещинами / Н.И.Карпенко, С.Н. Карпенко, А.Н.Петров, С.Н.Палювина. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2013.
16. Krishan A.L. Power resistance of compressed concrete elements with confinement reinforcement by means of meshes // Electronic magazine "Advances of Environmental Biology". – Vol. 8, № 6, May 2014. P. 1987...1990 http://www.aensiweb.com/aeb_online.html
17. Кришан А.Л., Заикин А.И., Сабиров Р.Р. Новая формула для определения относительных деформаций в вершине диаграммы "σ-ε" бетонного ядра трубобетонной колонны // Мат. 72-й межрегион. научн. конф.: Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2014. Т.2. С.30...33.
18. Storozhenko L.I., Ermolenko D.A., Lapenko O.I. 2010: Concrete filled steel tube, Poltava: TOV ACMI, 2010.
19. Людковский И.Г., Фонов В.М., Макаричева Н.В. Исследование сжатых трубобетонных элементов, армированных высокопрочной продольной арматурой // Бетон и железобетон. – 1980, № 7. С.17...19.
20. Кришан А.Л., Римшин В.И., Заикин А.И. Расчет прочности сжатых железобетонных элементов с косвенным армированием. Бетон и железобетон – взгляд в будущее // Научн. тр. III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону. Т.1. Теория железобетона. Железобетонные конструкции. Расчет и конструирование. – М.: МГСУ, 2014. С. 308...313.

21. Krishan A.L., Rimshin V.I., Erofeev V., Kurbatov V., Markov S. The energy integrity resistance to the destruction of the long-term strength concrete // *Procedia Engineering*. – 117(1), 2015. P.211...217, <http://www.scopus.com/inward/record/url>

22. Теличенко В.И., Римшин В.И. Критические технологии в строительстве // *Вестник Отделения строительных наук Российской академии архитектуры и строительных наук*. – 1998, № 4. С. 16...18.

REFERENCES

1. Krishan A.L. Trubobetonnye kolonny s predvaritel'no obzhatym betonnym jadrom. – Rostov-na-Donu: Rost. gos. stroit. un-t, 2011.

2. Nishiyama I., Morino S., Sakino K., Nakahara H. Summary of Research on Concrete-Filled Structural Steel Tube Column System Carried Out Under The US-JAPAN Cooperative Research Program on Composite and Hybrid Structures. – Japan. 2002.

3. Baig M.N., Fan J., Nie J. Strength of Concrete-Filled Steel Tubular Columns // *Journal of Tsinghua Science and Tehnology*. –11 (6), 2006. P. 657...666.

4. Georgios G. and Lam D. Axial capacity of circular concrete-filled tube columns // *Journal of Constructional Steel Research*. – 60, 2004. P. 1049...1068.

5. Fattah A.M. Behaviour of concrete columns under various confinement effects: A dissertation doctor of philosophy. – Kansas, USA: Kansas State University, 2012.

6. Masoudnia R., Amiri S., WanBadaruzzaman W.H. An Analytical model of short steel box columns with concrete infill (part I) // *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. – № 5, 2011. R.1715...1721.

7. Tao Z., Uy B., Han L.H., He H.S. Design of concrete-filled steel tubular members according to the Australian Standard AS 5100 model and calibration // *Australian Journal of Structural Engineering*. – 2008, №8(3), R. 197...214.

8. Tsuda K., Matsui C., Fujinaga T. Simplified Design Formula of Slender Concrete-Filled Steel Tubular Beam-Columns. In the Proceedings 6th ASCCS Conference on Composite and Hybrid Structures. – Los Angeles, 2000. P. 457...464.

9. Wey Y.Y., Wu Y.F. Unified stress-strain model of concrete for FRP confined columns // *Construction Building Materials*. – Vol. 26, № 1, 2012. P. 381...392.

10. Yang Y.F., Han L.H. Behavior of concrete-filled steel tubular (CFST) stub columns under eccentric partial compression // *Thin-Walled Structures*. – Vol. 49, №2, 2011. P. 379...395.

11. Yu T., Teng J.G. Behavior of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns with a square outer tube and a circular inner tube subjected to axial compression // *Journal of Composites for Construction*. – Vol. 17, 2013. R. 271...279.

12. Zaghi A.E., Saiidi M., Mirmiran A. Shake table response and analysis of a concrete-filled FRP tube bridge column // *Composite structures*, Elsevier. – Vol.94, № 5, 2012. P. 1564...1574.

13. Krishan A.L., Zaikin A.I. Raschet prochnosti trubobetonnyh kolonn // *Beton i zhelezobeton*. – 2011, № 3. S.17...19.

14. Krishan A.L., Rimshin V.I., Astafeva M.A., Narkevich M.Ju. Opredelenie deformacionnyh harakteristik betona // *Estestvennye i tehnicheckie nauki*. – 2014, № 9-10 (77). S. 367...369.

15. Model' deformirovaniya zhelezobetona v prirashhenijah i raschet balok-stenok i izgibaemyh plit s treshhinami / N.I.Karpenko, S.N. Karpenko, A.N.Petrov, S.N.Paljuvina. – Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2013.

16. Krishan A.L. Power resistance of compressed concrete elements with confinement reinforcement by means of meshes // *Electronic magazine "Advances of Environmental Biology"*. – Vol. 8, № 6, May 2014. P.1987...1990 <http://www.aensiweb.com/aebonline.html>

17. Krishan A.L., Zaikin A.I., Sabirov R.R. Novaja formula dlja opredelenija otnositel'nyh deformacij v vershine diagrammy " $\sigma-\epsilon$ " betonnoho jadra trubobetonnoj kolonny // *Mat. 72-j mezhregion. nauchn. konf.: Aktual'nye problemy sovremennoj nauki, tehniki i obrazovaniya*. – Magnitogorsk: Izd-vo Magnitogorsk. gos. tehn. un-ta im. G.I.Nosova, 2014. T.2. S.30...33.

18. Storozhenko L.I., Ermolenko D.A., Lapenko O.I. 2010: Concrete filled steel tube, Poltava: TOV ASMI, 2010.

19. Ljudkovskij I.G., Fonov V.M., Makaricheva N.V. Issledovanie szhatyh trubobetonnyh jelementov, armirovannyh vysokoprochnoj prodol'noj armaturoj // *Beton i zhelezobeton*. – 1980, № 7. S.17...19.

20. Krishan A.L., Rimshin V.I., Zaikin A.I. Raschet prochnosti szhatyh zhelezobetonnyh jelementov s kosvennym armirovanijem. *Beton i zhelezobeton – vzgljad v budushhee* // *Nauchn. tr. III Vserossijskoj (II Mezhdunarodnoj) konferencii po betonu i zhelezobetonu. T.1. Teorija zhelezobetona. Zhelezobetonnye konstrukcii. Raschet i konstruirovanie*. – M.: MGSU, 2014. С. 308...313.

21. Krishan A.L., Rimshin V.I., Erofeev V., Kurbatov V., Markov S. The energy integrity resistance to the destruction of the long-term strength concrete // *Procedia Engineering*. – 117(1), 2015. P.211...217, <http://www.scopus.com/inward/record/url>

22. Теличенко В.И., Римшин В.И. Критические технологии в строител'stve // *Вестник Отделения строител'nyh nauk Rossijskoj akademii arhitektury i stroitel'nyh nauk*. – 1998, № 4. С. 16...18.

Рекомендована кафедрой проектирования зданий и строительных конструкций МГТУ. Поступила 21.11.16.