

УДК 69.07

**К СТАТИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ ПЛАСТИНЧАТО-СТЕРЖНЕВЫХ ФЕРМ
РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ**

**TO THE STATIC CALCULATION OF PLATE-ROD TRUSSES
VARIOUS CONSTRUCTIVE SYSTEMS**

А.Н. ТОПИЛИН
A.N. TOPILIN

(Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет)
(National Research University Moscow State University of Civil Engineering)
E-mail: alex-topilin@mail.ru

В настоящей статье рассматриваются вопросы применения пластинчато-стержневых конструкций в промышленном и гражданском строительстве, а также статический расчет основных конструктивных решений пластинчато-стержневых ферм с различными вариантами загрузки.

Данные конструкции отличаются экономической эффективностью, которая обусловлена тем, что элементы этих конструкций, в целом подверженных силовому воздействию, осложненному кручением, работают в условиях более простого силового воздействия. Экспериментальные исследования подтвердили правильность определения усилий в элементах пластинчато-стержневой конструкции и расчетов ее прочности и деформативности.

This article contains information about application of plate-stem constructions in industrial and civil engineering, as well as static design of basic types of plate-stem structures with different types of load.

These structures could be highly economically effective because of exchange of complicated tension force effect to their elements to simpler force effect. Experimental studies approved correctness of evaluation of the forces in the elements of plate-rod design and calculations of its strength and deformability.

Ключевые слова: пластинчато-стержневая конструкция, статический расчет ферм, железобетонные конструкции.

Keywords: plate-stem structure, static analysis of trusses, reinforced concrete structure.

Общей особенностью пластинчато-стержневых конструкций является наличие решетки между продольными поясами, причем хотя бы один пояс и раскосы выполнены в виде пластин, ориентированных большей стороной поперечного сечения из плоскости самой конструкции [1...3].

На рис. 1 изображены пластинчато-стержневые ферма (а), колонна (б) и плита перекрытия (в).

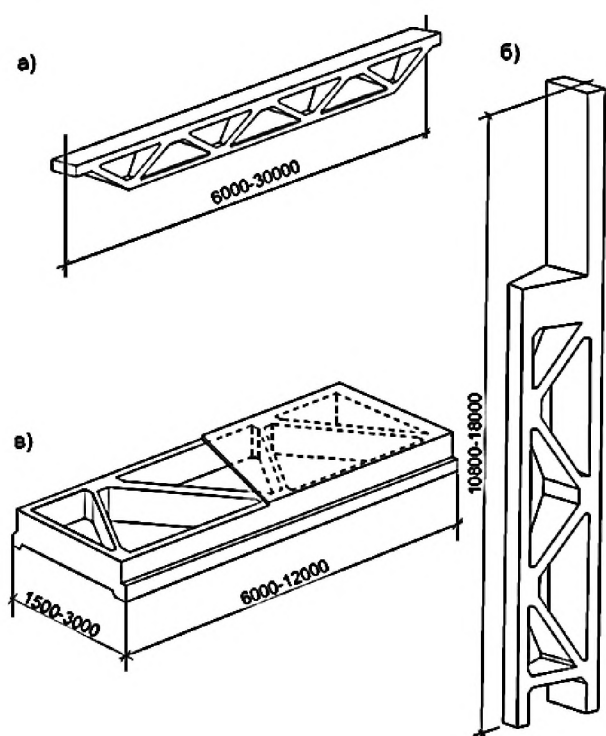


Рис. 1

Относительно гравитационных сил плоскость симметрии пластинчато-стержневых конструкций в целом может быть расположена параллельно (вертикально), как это имеет место в фермах, и перпендикулярно (горизонтально), как это имеет место в плитах покрытий и перекрытий.

Пластинчатые элементы способны сопротивляться действию изгибающих моментов, если они действуют в плоскостях этих пластин, и не сопротивляются изгибающим моментам, действующим из их плос-

кости. Благодаря этому пластинчато-стержневые конструкции в целом при внешних нагрузках, действующих в их собственных плоскостях, ведут себя как традиционные плоские фермы, но обладают высокой сопротивляемостью действию нагрузок, направленных из плоскости конструкций, и весьма высокой жесткостью на кручение, соизмеримой с жесткостью конструкций на изгиб в своей плоскости.

Пластинчато-стержневые конструкции в состоянии воспринимать крутящие моменты, если они в целом закреплены на опорах поперечными связями.

Пластинчато-стержневые конструкции следует относить к плоскостным, не пространственным конструкциям, поскольку оси симметрии сечений всех элементов располагаются в одной плоскости симметрии конструкции в целом.

Конструкция узлов соединения пластинчатых элементов в пластинчато-стержневых конструкциях отличается от узлов обычной плоской стержневой системы тем, что она обеспечивает значительно более жесткое соединение элементов в направлении из плоскости конструкции.

Пластинчато-стержневые конструкции целесообразны в тех случаях, когда на несущие конструкции действуют нагрузки большой интенсивности и расположены они вне плоскости конструкции.

В промышленных зданиях пластинчато-стержневые фермы могут быть применены в качестве главных несущих конструкций ригелей, прогонов междуэтажных перекрытий с нагрузками, передающимися с примыкающих к ним боковых грузовых площадей не равной интенсивности, а также в крайних конструкциях.

Прогноз данных по зданиям промышленного строительства показал, что наибольшее применение найдут здания с перекрытиями под нагрузки до 50 кН/м^2 . Поэтому использование пластинчато-стерж-

невых ферм в промышленном строительстве в будущем вполне актуально.

В промышленном производстве часто используется подвесное крановое оборудование грузоподъемностью до 10 т. Горизонтальные и вертикальные усилия от такого оборудования предъявляют дополнительные требования к несущим строительным конструкциям. Здесь вполне уместны пластинчато-стержневые фермы.

Пластинчато-стержневые несущие конструкции могут также применяться в цехах металлургической промышленности, в цехах горячей и холодной прокатки. Кроме упомянутого ранее, здесь весьма полезно применение пластинчато-стержневых колонн и ферм в качестве: подкрановых балок кранов большой грузоподъемности, при эксплуатации которых возникают горизонтальные тормозные силы значительной интенсивности в направлениях, параллельных поперечным рамам здания; конструкций, к которым можно крепить консольно-катучие краны, которые широко применяются в металлургии.

Применение пластинчато-стержневых конструкций возможно в цехах химической промышленности, где получили распространение многоэтажные здания с верхним большепролетным помещением с мостовым краном. Нижние этажи таких зданий имеют регулярную объемно-планировочную структуру с сеткой колонн (6×6) или (6×9) м, верхний этаж имеет пролет 12, 18, 24 м и оборудуется мостовыми или подвесными кранами грузоподъемностью до 10 т. Для монтажа и демонтажа оборудования, расположенного на верхнем этаже, в междуэтажных перекрытиях оставляются специальные проемы. В этом случае элемент, находящийся на контуре проема, будет испытывать одностороннюю нагрузку, вызывающую кручение. Целесообразно применение пластинчато-стержневых ферм во многих сооружениях угольной, коксохимической, горнорудной, целлюлозобумажной, текстильной отраслях промышленности, на предприятиях цветной металлургии и т.д., где, как правило, многоэтажные промышленные здания имеют нерегулярную объемно-планировочную структуру. В этих от-

раслях промышленности технологический процесс связан с устройством встроенного оборудования, бункеров, резервуаров и других подобных сооружений больших размеров, располагаемых на разных уровнях, создающих неравномерные нагрузки большой интенсивности.

На всех перечисленных выше объектах промышленности могут быть применены пластинчато-стержневые колонны в качестве основной несущей конструкции в цехах с крановым оборудованием различной грузоподъемности и любого режима работы (рис. 1).

Наличие крутящего момента, вызываемого ветровой, температурной нагрузками и тормозной силой крана, указывает на целесообразность применения такого типа колонн.

Пластинчато-стержневые колонны обладают, кроме жесткости на кручение, высокой устойчивостью в плоскостях продольных рам благодаря развитости их пластинчатых элементов в этом направлении. Это свойство позволяет в 2...3 раза увеличить длину температурных блоков и в определенных условиях отказаться от вертикальных стальных связей.

Пластинчато-стержневые фермы могут успешно применяться в качестве главных несущих промежуточных и контурных конструкций покрытий зданий с гибким мембранным кровельным ограждением. Из-за их относительно небольшого веса пластинчато-стержневые фермы могут успешно применяться при реконструкции и надстройке зданий и сооружений [4].

Целесообразно применение пластинчато-стержневых ферм в конструкциях ангаров. В этих сооружениях к основным несущим конструкциям могут прикладываться большие местные нагрузки любого направления, вызванные различным подвесным оборудованием. Особенно уместно применение пластинчато-стержневой фермы в качестве надворотной стропильной конструкции, на которую опираются, в своей верхней части, створки ворот ангара. Ворота ангаров воспринимают большую ветровую нагрузку, основную часть кото-

рой передают на нижний пояс стропильной конструкции, вызывая в ней кручение.

В городском строительстве целесообразно устройство однобалочных эстакад и легких мостов с применением пластинчато-стержневых ферм [1].

Пластинчато-стержневые сборные плиты (рис. 1-в) могут с выгодой использоваться в перекрытиях любых многоэтажных зданий с местными нагрузками большой интенсивности. Это обусловлено тем, что они обладают большой жесткостью на кручение и большой распределительной способностью, вследствие чего вовлекают в активную работу соседние незагруженные плиты.

До настоящего времени в этих условиях считалось целесообразным применение сборных конструкций тонкостенного многозамкнутого профиля в системах покрытий и перекрытий, работающих в плане в двух направлениях [5]. В отличие от этих конструкций пластинчато-стержневые плиты обладают открытым профилем и в связи с этим более технологичны.

Особенно эффективно применение пластинчато-стержневых плит в перекрытиях, опертых по контуру. В перекрытиях этой системы совместная работа сборных плит обеспечивается заполнением мелкозернистым бетоном продольных швов между ребрами, которые в этом случае должны быть шпоночной формы. Несмотря на наличие этих швов, нагрузка, находящаяся на перекрытии, передается и в продольном (относительно ребер плит) направлении и в поперечном. Кроме того раскосная решетка принимает участие в работе отдельной плиты на поперечный изгиб, приблизительно на 10% разгружая продольные ребра.

Транспортирование и монтаж пластинчато-стержневых конструкций осуществляются известными методами, так как по габаритным размерам и весу они мало отличаются от традиционных железобетонных конструкций.

В предыдущих работах [2], [3] подробно рассмотрен статический расчет пластинчато-стержневых ферм, по результатам которого определяются изгибающие момен-

ты, поперечные и продольные силы в каждом элементе фермы, а также расчеты по второй группе предельных состояний.

Пластинчато-стержневые фермы с линейным нижним поясом, сохраняя свое главное свойство – высокую жесткость на кручение, могут иметь некоторое разнообразие в конструктивных решениях, в видах нагружения внешними крутящими моментами. Примеры расчетных схем пластинчато-стержневых ферм отличаются углами наклона раскосов, наличием стоек и видами приложения внешнего крутящего момента.

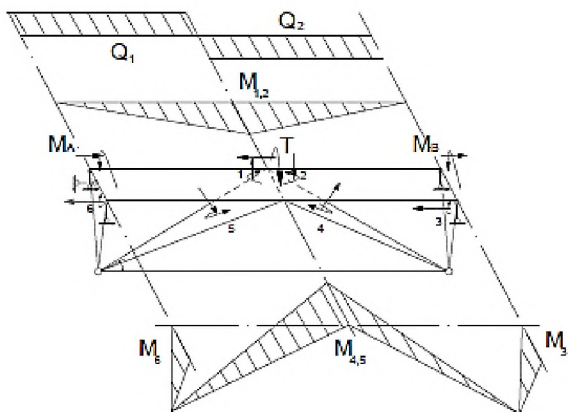
Нагрузки, приложенные в плоскости симметрии пластинчато-стержневой конструкции, вызывают в ее элементах только осевые воздействия, как в традиционных фермах [6...9].

На рис. 2 показана расчетная схема пластинчато-стержневой фермы с опорными стойками (а) – эпюры изгибающих моментов и поперечных сил; б) – диаграмма векторов моментов), в которой отсутствуют нисходящие раскосы. В опорном узле соединяются стойка и пластина верхнего пояса под углом 90° . Очевидно, что при такой конструкции узла опорный момент M_A уравнивается изгибающим моментом в стойке M_6 , а в пластине верхнего пояса опорные моменты равны нулю. В узле нижнего пояса возникает перерезывающая сила, которую можно определить, поделив момент, возникающий в верхнем узле стойки M_6 , на ее длину. Умножив полученную силу на длину раскоса, найдем максимальный изгибающий момент в раскосе M_5 :

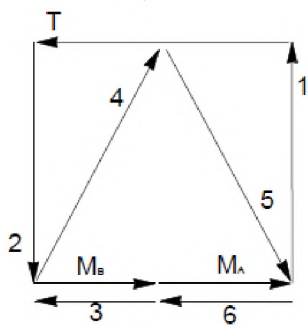
$$M_6 = M_3 = M_A = M_B = \frac{T}{2}. \quad (1)$$

Здесь и далее T – внешний крутящий момент; M_i – изгибающий момент в i -м элементе фермы.

Перерезывающая сила в нижнем узле, равная поперечной силе Q_6 , равна $\frac{T}{2h}$, где h – расстояние между продольными осями верхнего и нижнего поясов (рис. 2-а).



а)



б)

Рис. 2

Длина раскоса составит:

$$\ell^g = \frac{h}{\sin \alpha}.$$

Изгибающий момент в раскосе, вблизи верхнего узла, следующий:

$$M_5 = M_4 = Q_6 \ell^g = \frac{T}{2 \sin \alpha}. \quad (2)$$

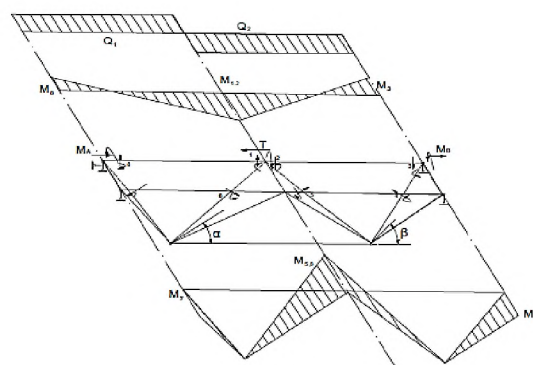
Проецируя этот момент на плоскость пластины верхнего пояса, находим изгибающий момент M_1 :

$$M_1 = M_2 = M_5 \cos \alpha = \frac{T}{2 \operatorname{tg} \alpha}. \quad (3)$$

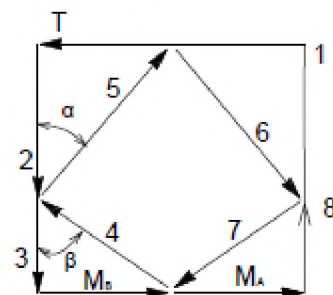
Изгибающие моменты в пластинчатых элементах данной фермы можно определить графически, путем построения диаграммы векторов моментов (рис. 2-б).

Следующий пример пластинчато-стержневой фермы отличается тем, что раскосы имеют разный угол наклона по отношению к поясам (рис. 3 – расчетная схема

пластинчато-стержневой фермы с различным углом наклона раскосов: а – эпюры изгибающих моментов и поперечных сил; б – диаграмма векторов моментов).



а)



б)

Рис. 3

В этом случае, как видно из диаграммы векторов моментов, в нисходящих и восходящих раскосах будут возникать различные по величине изгибающие моменты:

$$M_4 = M_7 = \frac{T}{2 \sin \beta}; \quad (4)$$

$$M_5 = M_6 = \frac{T}{2 \sin \alpha}; \quad (5)$$

$$M_1 = M_2 = \frac{T}{2 \operatorname{tg} \alpha}; \quad (6)$$

$$M_3 = M_8 = \frac{2T}{3}. \quad (7)$$

На рис. 4 (расчетная схема пластинчато-стержневой фермы с несимметричным нагружением крутящим моментом: а – эпюры изгибающих моментов и поперечных сил; б – диаграмма векторов моментов) показана пластинчато-стержневая ферма с двумя промежуточными узлами, из которых

только один загружен внешним крутящим моментом.

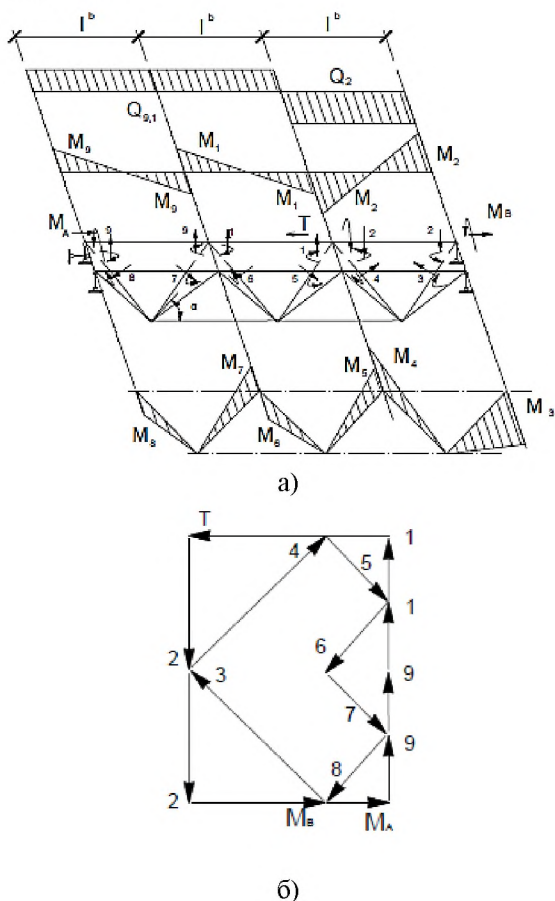


Рис. 4

На рисунке приведены эпюры изгибающих моментов, возникающих во всех элементах фермы, и поперечные силы в верхнем поясе, построена диаграмма векторов моментов. В этом случае опорные реакции не равны между собой, а связаны зависимостью:

$$\frac{M_A}{M_B} = \frac{\ell^b}{\ell^b + \ell^b} = \frac{1}{2}, \quad 2M_A = M_B = \frac{2T}{3}, \quad (8)$$

где ℓ^b – длина панели верхнего пояса.

В соответствии с этим и изгибающие моменты в раскосах, а также в элементах верхнего пояса будут разными:

$$M_2 = 2M_1 = 2M_9 = \frac{2T}{3 \operatorname{tg} \alpha}, \quad (9)$$

$$M_3 = M_4 = 2M_6 = 2M_7 = 2M_8 = \frac{2T}{3 \sin \alpha}. \quad (10)$$

Возможен вариант пластинчато-стержневой фермы с раскосами и стойками. В тех случаях, когда крутящие моменты приложены к узлам сопряжения верхнего пояса с раскосами, стойки не принимают участия в общей работе конструкции, изгибающие моменты в них равны нулю. В случае приложения момента к узлу сопряжения верхнего пояса и стойки в последней возникает изгибающий момент, равный по величине внешнему крутящему моменту, но обратно направленный $M_7 = T$.

Диаграмма векторов моментов показывает, что изгибающие моменты в раскосах равны между собой:

$$M_4 = M_5 = M_6 = M_8 = M_9 = M_{10} = \frac{T}{2 \sin \alpha}. \quad (11)$$

В панелях верхнего пояса максимальные изгибающие моменты тоже равны между собой:

$$M_1 = M_2 = M_3 = M_{11} = \frac{T}{2 \operatorname{tg} \alpha}. \quad (12)$$

Во всех перечисленных примерах поперечные силы в элементах пластинчато-стержневых ферм определяются по соответствующим эпюрам изгибающих моментов [2], [3].

ВЫВОДЫ

Пластинчато-стержневые конструкции отличаются экономической эффективностью, которая обусловлена тем, что элементы этих конструкций, в целом подверженных силовому воздействию, осложненному кручением, работают в условиях более простого силового воздействия. Нагрузки, приложенные вне плоскости симметрии конструкции, воздействуют на конструкцию в целом, вызывая кручение. При этом пластинчатые элементы кроме осевых воздействий испытывают поперечный изгиб. Перечисленные особенности данных конструкций позволяют им найти широкое применение в промышленном и гражданском строительстве.

1. *Иванчев И.И., Топуров К.Х., Топилин А.Н., Иваненко Н.И.* Железобетонные автодорожные мосты. – М.: АСВ, 2008.

2. *Топилин А.Н.* Пластинчато-стержневые железобетонные конструкции с повышенной сопротивляемостью кручению // Вестник МГСУ. – 2011, №2-1. С. 105...109.

3. *Топилин А.Н.* Расчет пластинчато-стержневых ферм по второй группе предельных состояний // Промышленное и гражданское строительство. – 2016, № 7. С. 61...64.

4. *Алексеев Ю.В., Топилин А.Н., Комарова И.М.* Учет силовых воздействий надстроек и мансард ломаного очертания на жилые дома постройки 1950-х-1960-х годов // Промышленное и гражданское строительство. – 2001, № 3. С. 39...40.

5. *Chanakya Arya.* Design of Structural Elements. Concrete, steelwork, masonry and timber designs to British Standards and Eurocodes. Taylor&Francis e-Library, GB, 2009. P.502.

6. *Алмазов В.О., Топилин А.Н.* Руководство для проектировщиков к Еврокоду 4: проектирование сталежелезобетонных конструкций EN 1994-1-1. / Пер. с англ. В.О. Алмазов, А.Н. Топилин. – Изд. 2-е. – МГСУ, 2012.

7. *Тамразян А.Г., Мкртычев О.В., Дорожинский В.Б.* Расчет большепролетной конструкции на аварийные воздействия методами нелинейной динамики // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012, № 5. С. 331...334.

8. *Клюева Н.В., Тамразян А.Г.* Основополагающие свойства конструктивных систем, понижающих риск отказа элементов здания // Изв. Юго-Западн. гос. ун-та. – 2012, № 5-2 (44). С. 126...131.

9. *Tamrazyan A.G.* The assessment of reliability of punching reinforced concrete beamless slabs under the influence of a concentrated force at high temperatures. XXV Polish-Russia-Slovak seminar-theoretical foundation of civil engineering. Procedia Engineering. – V.153. P.715-720. 2016. Zilina, SLOVAKIA.

1. *Ivanchev I.I., Topurov K.H., Topilin A.N., Ivanenko N.I.* Zhelezobetonnye avtodorozhnye mosty. – М.: ASV, 2008.

2. *Topilin A.N.* Plastinchato-sterzhnevye zhelezobetonnye konstrukcii s povyshennoj soprotivljaemost'ju krucheniju // Vestnik MGSU. – 2011, №2-1. S.105...109.

3. *Topilin A.N.* Raschet plastinchato-sterzhnevyyh ferm po vtoroj grupe predel'nyh sostojanij // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2016, № 7. S.61...64.

4. *Alekseev Ju.V., Topilin A.N., Komarova I.M.* Uchet silovyh vozdeystvij nadstroek i mansard lomnogo ochertanija na zhilye doma postrojki 1950-h-1960-h godov // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2001, № 3. S. 39...40.

5. *Chanakya Arya.* Design of Structural Elements. Concrete, steelwork, masonry and timber designs to British Standards and Eurocodes]. Taylor&Francis e-Library, GB, 2009. P.502.

6. *Almazov V.O., Topilin A.N.* Rukovodstvo dlja proektirovshhikov k Evrokodu 4: proektirovanie stalezhelezobetonnyh konstrukcij EN 1994-1-1. / Per. s angl. V.O. Almazov, A.N. Topilin. – Izd. 2-e. – MGSU, 2012.

7. *Tamrazjan A.G., Mkrtychev O.V., Dorozhinskij V.B.* Raschet bol'sheproletnoj konstrukcii na avarijnye vozdeystvija metodami nelinejnoj dinamiki // Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja. – 2012, № 5. S.331...334.

8. *Kljueva N.V., Tamrazjan A.G.* Osnovopolagajushhie svojstva konstruktivnyh sistem, ponizhajushhih risk otkaza jelementov zdanija // Izv. Jugo-Zapadn. gos. un-ta. – 2012, № 5-2 (44). S. 126...131.

9. *Tamrazyan A.G.* The assessment of reliability of punching reinforced concrete beamless slabs under the influence of a concentrated force at high temperatures. XXV Polish-Russia-Slovak seminar-theoretical foundation of civil engineering. Procedia Engineering. – V.153. P.715-720. 2016. Zilina, SLOVAKIA.

Рекомендована Ученым советом. Поступила 18.04.17.