



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

N3, TOM 16 (2010) 163-170

УДК 624.21

(10)-0217-1

АЕРОПРУЖНА НЕСТІЙКІСТЬ БАЛОЧНИХ МОСТОВ

М. І. Казакевич

*Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту,
вул. Ак. В. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, Україна, 49010.*

E-mail: mkazak@rambler.ru

Отримана 8 липня 2010; прийнята 27 серпня 2010.

Анотація. У статті приведений аналіз причин виникнення аеропружної нестійкості вихрового збудження багатопролітного балочного моста через р. Волгу в м. Волгограді. Даний прогноз можливих способів стабілізації споруди у вітровому потоці на першому етапі експлуатації моста з однією балкою жорсткості. Будівництво другої черги моста за певних умов об'єднання двох суміжних балок жорсткості може значно погіршити як аеропружну стійкість моста, так і його втомну міцність.

Ключові слова: вихрове збудження, аеропружна нестійкість, втомна міцність.

АЭРОУПРУГАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ БАЛОЧНЫХ МОСТОВ

М. И. Казакевич

*Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта,
ул. Ак. В. Лазаряна, 2, г. Днепропетровск, Украина, 49010.*

E-mail: mkazak@rambler.ru

Получена 8 июля 2010; принята 27 августа 2010.

Аннотация. В статье приведен анализ причин возникновения аэроупругой неустойчивости вихревого возбуждения многопролетного балочного моста через р. Волгу в г. Волгограде. Дан прогноз возможных способов стабилизации сооружения в ветровом потоке на первом этапе эксплуатации моста с одной балкой жесткости. Строительство второй очереди моста при определенных условиях объединения двух смежных балок жесткости может значительно ухудшить как аэроупругую устойчивость моста, так и его усталостную прочность.

Ключевые слова: вихревое возбуждение, аэроупругая неустойчивость, усталостная прочность.

AEROELASTIC INSTABILITY OF GIRDER BEAM BRIDGES

Mykhaylo I. Kazakevitch

*Dnipropetrovsk National University of Railway Transport,
2, Academician Lazaryana, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010.*

E-mail: mkazak@rambler.ru

Received 8 July 2010; accepted 27 August 2010.

Abstract. The paper has cited the analysis of causes of origin of aeroelastic instability of vortex excitation of the multispan girder beam bridge across the Volga in Volgograd, Russia. The forecast of the capable stability

ways of the construction in a vortex flow at the first stage of the bridge operation with one stiffening girder has been made. The second phase of bridge construction at the certain terms of merging of two adjacent stiffening girders can considerably improve both bridge aeroelastic stability and its fatigue strength.

Keywords: vortex excitation, aeroelastic instability, fatigue strength.

Введение

На протяжении многих десятилетий архитекторов и инженеров преследовала одна из серьезных проблем системного характера.

Она связана с трансформацией концептуальных положений расчета инженерных конструкций и сооружений. Все существовавшие и существующие теории расчета опираются на различные гипотезы, допущения, а иногда и на упрощения и развиваются в соответствии с расширением масштабных параметров сооружений.

Игнорирование влияния масштабных факторов при переходе от традиционных «малых» систем к «большим» в рамках одной и той же теории расчета сопровождается ошибками, а иногда и трагическими последствиями. Это неудивительно, поскольку принимаемые в расчетах гипотезы и допущения справедливы до определенных пределов масштабов сооружений.

Расчет сооружений на каждом историческом этапе развития теории формализуется сводом положений и правил и представляется в различных странах как СНиП, Коды, Стандарты и т. п.

При переходе от малых архитектурных форм к большим принятые гипотезы и, особенно, допущения неприемлемы вплоть до физического абсурда для больших архитектурных форм. Энергетический подход к этой проблеме позволяет избежать роковых ошибок.

Нормирование аэродинамической устойчивости

Интегральными критериями оценки масштаба архитектурной формы сооружения выступают такие физические параметры, как его гибкость (жесткость) и частоты (периоды) пространственных колебаний.

В свое время, когда авторы СНиП 2.01.07-85* [1], преодолевая устоявшуюся традицию, предприняли попытку ввести понятие гибких и жестких конструкций и сооружений, взаимодействующих

с ветровых потоком, они столкнулись с проблемой существования пограничного класса конструкций — квазигибких (квазижестких) при их дифференциации. В конечном итоге, впервые в Строительных Нормах было введено понятие гибкого сооружения в завуалированной форме в качестве компромисса путем критериальной оценки частоты колебаний (см. [1], п. 6.8). Руководствуясь рекомендациями СНиП [1], при проектировании гибких сооружений, в т. ч. мостов больших пролетов независимо от их расчетной схемы необходимо:

1. Выполнить расчет на пульсационное воздействие турбулентного ветрового потока с учетом s первых форм собственных колебаний в соответствии с п.п. 6.8—6.10.
2. Принять в расчетах коэффициент надежности по ветровой нагрузке равным $\gamma_f = 1,6$ [2], что отражает, с одной стороны, расчетную долговечность таких сооружений, с другой стороны, специфические орографические особенности ветрового потока вдоль русла реки.
3. Выполнить проверку возможности возникновения явлений аэроупругой неустойчивости вихревого возбуждения в соответствии с п. 6.1 [1], а также дивергенции, срывного и классического флаттера, галопирования, бафтинга, параметрических резонансов [3, 4], а также [1] п. 9.

Вместе с тем, процедуры перечисленных расчетов на нормативном уровне в Российской Федерации отсутствуют [5], что, однако, не избавляет авторов проекта от неперемного требования обеспечения прочности и надежности сооружений в поле всех действующих нагрузок и воздействий и не препятствует использованию известных и широко применяемых в практике мирового мостостроения рекомендаций EUROCODE pr. EN 1991-1-4:2004 [3].

Можно предположить, что необходимые расчеты в составе проектов не выполняются,

прежде всего, в силу традиционного снисходительного отношения к ветровым воздействиям на мосты балочных систем. Однако применяемые в современном мостостроении геометрические параметры строений, как показывают динамические расчеты спектра собственных частот, позволяют относить сооружения к классу весьма гибких и чрезвычайно чувствительных к ветровым воздействиям.

Многолетний опыт исследований, проектирования и эксплуатации гибких конструкций и, в первую очередь, мостов, показывает, что современные тенденции строительной индустрии требуют от инженеров выхода за пределы быстро «стареющих» национальных норм и использования новейших результатов достижений научно-технической мысли. К этому можно отнести также обширную информацию, которая содержится в многочисленных разделах EUROCODE [3], периодически совершенствующегося. Главным критерием современных архитектурных форм становится их гибкость, мерой которой могут выступать частоты (периоды) пространственных колебаний. К ним следует обратиться при анализе причин аэроупругой неустойчивости многопролетного балочного моста через р. Волгу в Волгограде.

Краткая характеристика моста

На примере многопролетного балочного моста через р. Волгу в Волгограде проиллюстрируем актуальность проблемы обеспечения аэроупругой устойчивости подобных сооружений. Этот мост по расчетной схеме $86,6 \times 2 + 126,0 \times 3 + 155,0 \times 3 + 126,0 + 69,0$ м был введен в эксплуатацию в 2009 году (первая очередь). Но уже вечером 20.05.2010 в интервале 17–19 часов в трех 155-метровых пролетных строениях наблюдались интенсивные колебания в вертикальной плоскости с амплитудой при скорости ветра $v \cong 15–17$ м/с (по данным оперативных наблюдений).

Поперечное сечение коробчатой металлической балки жесткости моста (первая очередь) представлено на рис. 1.

Для анализа возможности возникновения явлений аэроупругой неустойчивости необходим ряд параметров данного сооружения, в частности, геометрические, массовые, и динами-

ческие характеристики, которые будут по мере необходимости приведены ниже.

Вихревое возбуждение

Понять, что произошло, и принять компетентное решение по устранению причин возникновения масштабной динамической реакции сооружения, не предусмотренной расчетами, возможно только при условии изучения этих причин на основе достоверных оценок геометрических и динамических характеристик сооружения и параметров механической структуры ветрового потока. Установлено, что расчетное значение частоты первого тона изгибных колебаний пролетного строения моста в вертикальной плоскости составляет $\omega_g \cong 0,41$ Гц (в период $T_g = 2,44$ с), что очень близко к зарегистрированному в процессе интенсивных колебаний моста значению.

Этот факт не оставляет сомнений в том, что при выбранной расчетной схеме моста в виде многопролетной неразрезной системы с максимальными пролетами по 155 м данное сооружение относится к классу чрезвычайно гибких вследствие очень низкой изгибной жесткости с инфранизкочастотным (до 1 Гц) спектром.

Обратимся к известной формуле критической скорости аэроупругой неустойчивости вихревого возбуждения [3, 4]

$$V_{кр}^{в.в.} = \frac{H\omega}{Sh}, \quad (1)$$

которая наряду со значениями высоты поперечного сечения H пролетного строения (миделево сечение) и чистоты вертикальных колебаний моста ω включает аэродинамический параметр Sh — число Струхалия, отражающий важнейшее аэродинамическое качество балки жесткости с принятой формой поперечного сечения. В частности, для первой очереди данного моста можно принимать [4, 6] число Струхалия равным

$$Sh = 0,10 \div 0,12. \quad (2)$$

Таким образом, при высоте поперечного сечения балки жесткости $H \cong 3,29$ м значение критической скорости вихревого возбуждения составляет

$$V_{кр}^{в.в.} = \frac{3,29 \cdot 0,41}{0,11} = 12,3 \text{ м/с.}$$

Аэродинамические качества моста определяет не только собственно форма поперечного сечения балки жесткости моста (Sh), но и тип перильного, шумового и барьерного ограждений. EUROCODE [3] рассматривает высоту пролетного строения в формуле (1) как некоторое эффективное значение

$$H + 0,6 < H_{эфф} < H + 2h, \text{ м,}$$

где h — высота сплошного перильного, барьерного и шумового ограждения.

С учетом перильного и барьерного ограждений можно считать $H_{эфф} \cong 4,2$ м. Следовательно,

$$V_{кр}^{в.в.} = \frac{4,2 \cdot 0,41}{0,11} = 15,7 \text{ м/с,}$$

что очень близко к наблюдавшемуся значению в процессе интенсивных колебаний моста.

Как показывают аналитические и экспериментальные исследования [7], еще один важный

параметр пролетного строения моста — число S_c (или приведенное демпфирование $\delta_{пр}$)

$$S_c = \delta_{пр} = \frac{2m\delta}{\rho H^2} \quad (3)$$

для данного типа поперечного сечения пролетного строения моста [3, 4, 7, 8] составляет $S_c \cong 4 \div 5$, что определяет значение относительных амплитуд автоколебаний [7]

$$\frac{a}{H} \cong 0,15 \div 0,20,$$

практически совпадающее с наблюдавшимися значениями при колебаниях моста.

В формуле (3) приняты следующие обозначения: m , H — погонная масса и высота балки жесткости, ρ — плотность воздуха, δ — мера диссипации (рассеивания) энергии колебаний моста. Следовательно, диссипативные свойства сооружения являются важным управляющим параметром автоколебаний вихревого возбуждения [7, 8]. Более того, существует пороговое

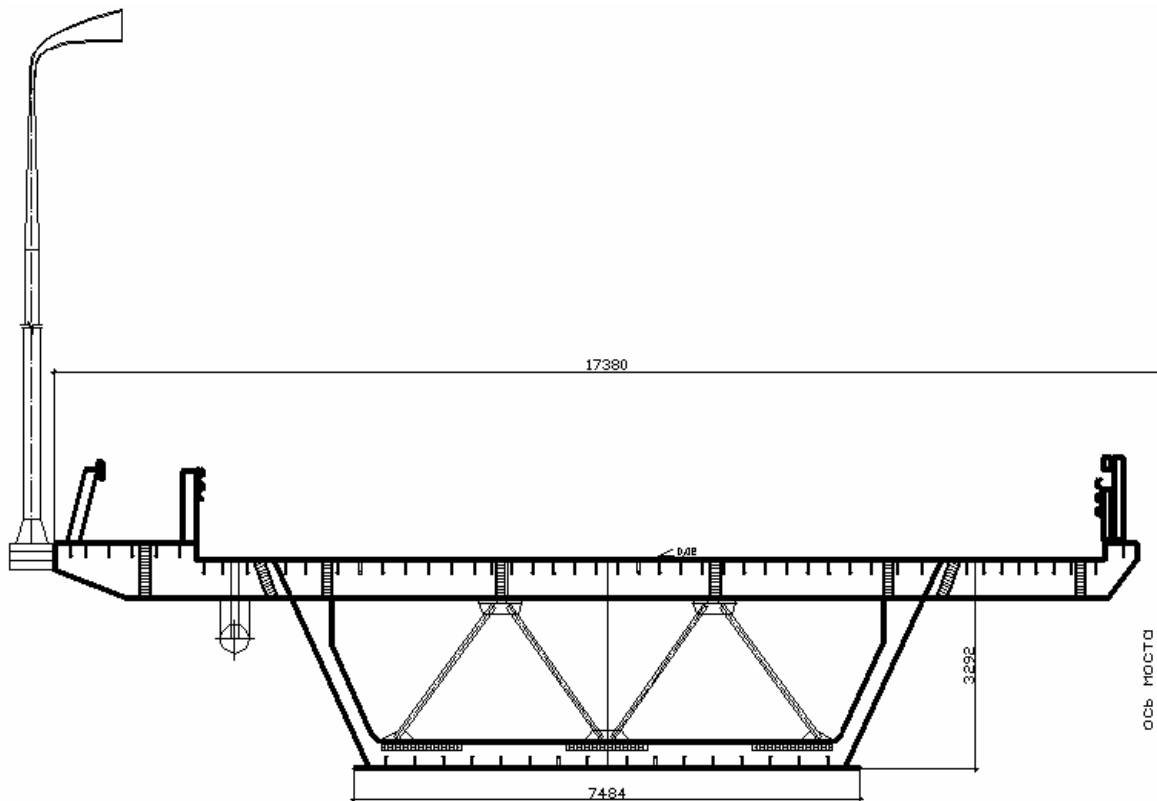


Рисунок 1. Поперечное сечение балки жесткости (первая очередь): А-А — ось поперечного сечения пролетного строения спаренного моста.

значение уровня диссипации в системе [8], выше которого явление вихревого возбуждения физически невозможно.

Необходимым и достаточным условием возникновения явления аэроупругой неустойчивости вихревого возбуждения наряду с критерием $V_{кр}^{в.в.} < V_{расч}$ являются также свойства ветрового потока: направление, скорость и экспозиция, т. е. длительность его воздействия в неизменном режиме. Только при достаточной длительности действия такого потока сооружение может получить необходимое количество кинетической энергии для возникновения и поддержания автоколебаний.

Рассеяние энергии колебаний

Оценка диссипативных свойств моста в ветровом потоке возможна по формуле:

$$\delta_{эфф} = \delta_o + \delta(V) + \delta_{демт}, \quad (4)$$

где δ_o — конструкционное демпфирование как параметр рассеяния энергии колебаний в материале конструкций, узлах и соединениях (логарифмический декремент колебаний); $\delta(V)$ — аэродинамическое демпфирование в элементах сооружения при их взаимодействии с ветровым потоком скорости v ; $\delta_{демт}$ — дополнительное демпфирование сооружения в целом при введении искусственных источников рассеивания энергии колебаний в различные элементы, узлы, соединения и опорные части моста в виде демпферов, амортизаторов, поглотителей колебаний, упруго-вязких и иных связей, вибропоглощающих покрытий [4, 9].

Последний вид рассеяния энергии колебаний моста $\delta_{демт}$ может зависеть в разной степени от частот, амплитуд, скоростей и ускорений пространственных колебаний

$$\delta_{демт} = \delta(\omega, y, \dot{y}, \ddot{y}) \quad (5)$$

и имеет тенденцию к снижению при возрастании скорости ветрового потока (рис. 2).

Оба вида демпфирования $\delta(V)$ и $\delta_{демт}$ можно весьма приближенно оценить при аэродинамических экспериментальных исследованиях моделей мостов с учетом дополнительных демпфирующих устройств, перечисленных выше. Однако наиболее достоверная оценка

возможна только на основе натуральных испытаний и наблюдений (мониторинга) в течение не менее одного года.

Усталостная прочность

Колебания вихревого возбуждения не вызывают значительного снижения усталостной прочности несущих конструкций моста только при условии [3]

$$V_{кр}^{в.в.} > 1,25V_{расч}. \quad (6)$$

В тех случаях, когда $V_{кр}^{в.в.} < V_{расч}$, необходимо рассчитывать усталостную прочность не только на действие подвижных нагрузок, но и на аэроупругие колебания вихревого возбуждения по приближенной методике (см. [4], п. 1.4) или в соответствии с рекомендациями (см. [3], п. Е.1.5.2.6).

Как видно из формулы (1), снижение числа Струхала Sh повышает критическую скорость вихревого возбуждения. Если при этом $V_{кр}^{в.в.} < V_{расч}$, т. е. устранить возможность возникновения явления аэроупругой неустойчивости не удастся, следует ожидать непропорциональное увеличение амплитуд автоколебаний, поскольку, как показано в работе [7],

$$\bar{a} = \frac{a}{H} \sim \frac{1}{Sh^2}. \quad (7)$$

Это означает, что при определенных направлении, скорости ветра $V \leq V_{расч}$ и его экспозиции может возникнуть аэроупругая неустойчивость вихревого возбуждения при более неблагоприятных условиях, чем наблюдавшаяся реакция моста в мае 2010 года:

- более высокие значения скорости ветра, следовательно, более высокие уровни энергии ветрового потока U приносятся в колеблющуюся систему на каждом цикле автоколебаний, поскольку

$$U \sim V^2; \quad (8)$$

- возрастающие уровни динамических напряжений в несущих конструкциях моста, что несомненно приводит к снижению их усталостной прочности.

Наряду с проверкой аэроупругой неустойчивости вихревого возбуждения в составе расчетов моста необходимо выполнить оценку

возможности возникновения пяти намного более опасных явлений аэроупругой неустойчивости: галопирования, дивергенции, срывного или изгибно-крутильного флаттера и бафтинга [3, 4, 5]. Однако уже на основании анализа результатов динамического расчета с учетом соотношения B/H поперечного сечения балки жесткости можно с абсолютной уверенностью утверждать, что для первой очереди моста эти типы в реальных условиях невозможны. Так, при $B/H \cong 5,3$ отрицательное аэродинамическое демпфирование как основное условие возникновения галопирования [4, 10] физически невыполнимо.

В то же время отношение частот собственных колебаний кручения и изгиба в вертикальной плоскости $\omega_{круч}/\omega_{изг} \cong 7$ значительно превосходит пороговое значение ($\omega_{круч}/\omega_{изг} = 2$), что указывает смещение критической скорости флаттера в область нереальных значений скорости ветра в приземном слое атмосферы [3, 4].

Заключение

Из анализа формулы (1) следует, что для повышения критической скорости аэроупругой неустойчивости вихревого возбуждения вплоть до выполнения условия (6) [3] необходимо:

- либо снизить число Струхала Sh в 2,5 раза, доведя его значение до $Sh \cong 0,05$, что для

инженерных сооружений в приземном слое атмосферы нереально;

- либо повысить изгибную жесткость моста в вертикальной плоскости в 2,5 раза, что не менее нереально;
- либо одновременно снизить число Струхала и повысить изгибную жесткость таким образом, чтобы в совокупности этих двух мероприятий был достигнут необходимый эффект (6), что возможно при выполнении условия

$$\left(\frac{\omega}{Sh}\right)_{\text{новое}} \geq 2,5 \left(\frac{\omega}{Sh}\right)_{\text{расчетное}}; \quad (9)$$

- либо в реально возможной мере повысить комплексный параметр (9) $k = \omega/Sh$ и при этом ввести искусственные источники рассеяния энергии, перечисленные выше, что не устраняет условий возникновения явления неустойчивости в режиме вихревого возбуждения, но позволит обеспечить усталостную прочность на протяжении расчетного срока эксплуатации моста.

В последнем из перечисленных выше вариантов надлежит обеспечивать систематический контроль, настройку и надежную эксплуатацию искусственных источников поглощения энергии, поскольку их присутствие в конструкциях моста частично превращает данное сооружение в механизм.

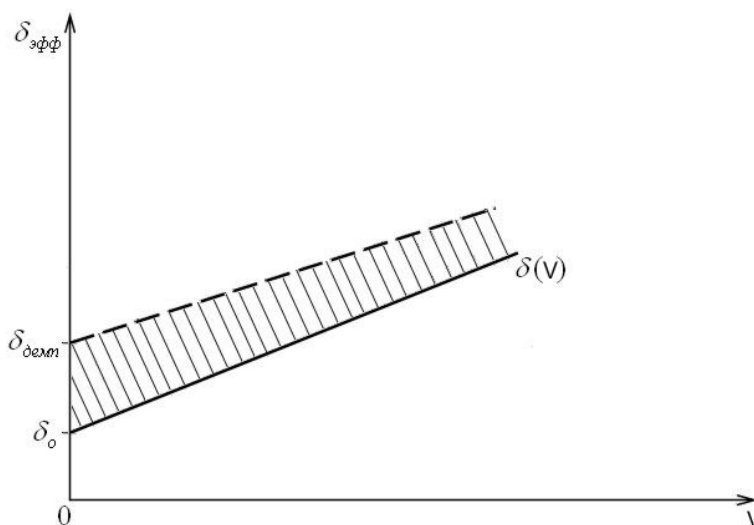


Рисунок 2. Структура механизмов рассеяния энергии сооружения в ветровом потоке.

Кроме того, если в рамках последнего варианта значение частоты изгибных вертикальных колебаний не удастся увеличить выше 1 Гц, потребуется установить в соответствии с современными нормами ISO 2631/1, ISO 2631/3 и ISO 6897-84(E) и внедрить в режиме эксплуатации моста допустимые дозы вибрации для обслуживающего персонала при их пребывании на сооружении [11].

Отдельного комментария заслуживает анализ аэроупругой устойчивости мостового перехода во время и после завершения строительства его второй очереди. Он будет определен следующими обстоятельствами:

- 1) способом объединения балок жесткости первой и второй очереди возведения сооружения;
- 2) влиянием принятого для реализации способа объединения на крутильную жесткость пролетного строения моста;
- 3) влиянием способов объединения балок жесткости на аэродинамические качества и характеристики обтекания спаренного пролетного строения ветровым потоком.

Тем не менее, можно прогнозировать с высокой степенью вероятности значительное снижение числа Струхала, крутильной жесткости, критической скорости дивергенции и изгибно-крутильного флаттера, низкое значение критической скорости бафтинга при определенных способах объединения балок жесткости пролетного строения мостового перехода.

Достоверность анализа могут обеспечить аэродинамические экспериментальные исследования и использование основных положений EUROCODE [3].

Литература

1. Нагрузки и воздействия : СНиП 2.01.07-85*. — М. : Госстрой России, 2004. — 44 с.
2. Цейтлин А. И. Новая редакция раздела «Ветровые нагрузки» главы СНиП «Нагрузки и воздействия» / А. И. Цейтлин, А. С. Бернштейн и др. // Строительная механика и расчет сооружений. — 1987. — № 6. — С. 28–33.
3. Action of structures: EUROCODE, pr. EN 1991-1-4:2004. — General actions, Wind. — 148 p.p.
4. Казакевич М. И. Аэродинамика мостов / Казакевич Михаил Исаакович. — М. : Транспорт, 1987. — 240 с.
5. Мосты и трубы : СНиП 2.05.03-84. — М. : Госстрой России, 2002. — 200 с.
6. Казакевич М. И. Аэроупругие характеристики мостовых конструкций / М. И. Казакевич // Труды ЦНИИПСК «Исследование металлических конструкций мостовых сооружений». — М., 1985. — С. 31–39.
7. Казакевич М. И. Аэродинамическое демпфирование колебаний плохообтекаемых тел, обусловленных вихревым возбуждением / М. И. Казакевич // Докл. АН УССР, сер. А. — 1987. — № 9. — С. 35–38.
8. Казакевич М. И. Аэроупругие колебания тела круглоцилиндрической формы в потоке воздуха / М. И. Казакевич // Гидроаэромеханика, ДГУ. — 1973. — № 6. — С. 53–60.
9. Загора А. Л. Гашение колебаний мостовых конструкций / А. Л. Загора, М. И. Казакевич. — М. : Транспорт, 1983. — 134 с.
10. Kazakevitch M. I. Analytical Solution for Galloping / Kazakevitch M. I., Vasilenko O. H. // J. Eng. Mech., ASME, vol. 122. — USA, 1996. — № 6. — P. 555–558.
11. Казакевич М. И. Введение в виброэкологию зданий и сооружений / М. И. Казакевич, В. В. Кулябко. — Днепропетровск : [б. в.], 1996. — 200 с. — ISBN 5-7763-8661-6.

Казакевич Михайло Ісаакович — заслужений діяч науки і техніки України, професор кафедри «Мости» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. Дійсний член Транспортної академії України. Член Української Асоціації з металевих конструкцій. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність будівельних металевих конструкцій, динаміка і аеродинаміка будівельних конструкцій.

Казакевич Михаил Исаакович — заслуженный деятель науки и техники Украины, профессор кафедры «Мосты» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. Действительный член Транспортной академии Украины. Член Украинской Ассоциации по металлическим конструкциям. Научные интересы: эксплуатационная надежность строительных металлических конструкций, динамика и аэродинамика строительных конструкций.

Mykhaylo I. Kazakevych — a Professor of the Bridges Department of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, an Honoured Scientist of Ukraine, a Full Member of the Academy of Transport of Ukraine, a Fellow of the Ukrainian Association on Metal Structures. Research interests: operational reliability of building metal structures, dynamics and aerodynamics of building structures.