



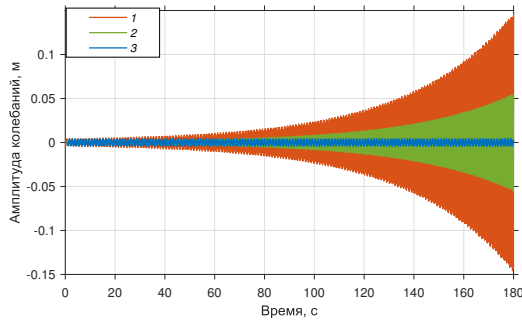




### 3. Результаты компьютерного моделирования

Для компьютерного моделирования параметры моста взяты из работ [3,10]: масса  $M = 81$  т, жесткость  $K = 3.3 \cdot 10^6$  кг/с<sup>2</sup>, ширина пролета  $2l = 4$  м. Параметры пешехода выбраны следующими: средняя амплитуда  $A_p = 7$  град и частота шага  $\omega_p = 0.86$  Гц; параметры нейромускулярной модели:  $\omega = 30$ ,  $\xi = 0.7$ ,  $K_\varphi = 0.1$ ,  $K_{\dot{\varphi}} = 50$ .

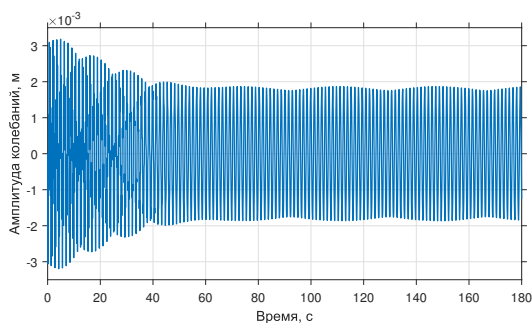
Точное воспроизведение процесса раскачки системы осложняется тем фактом, что при достижении некоторой некомфортной для пешеходов амплитуды колебаний моста они прекращают идти. В связи с этим, предполагается, что порог некомфортной амплитуды составляет 10-15 см, после чего, пешеход, скорее всего, остановится. На рис. 1 показаны результаты моделирования при различных параметрах модели пешехода. Видна зависимость амплитуды колебаний моста от количества пешеходов, частоты шагов и времени запаздывания в вестибулярной системе. Уменьшение частоты шага пешехода может предотвратить раскачку моста (рис. 2а), как и увеличение жесткости опор (рис. 2б).



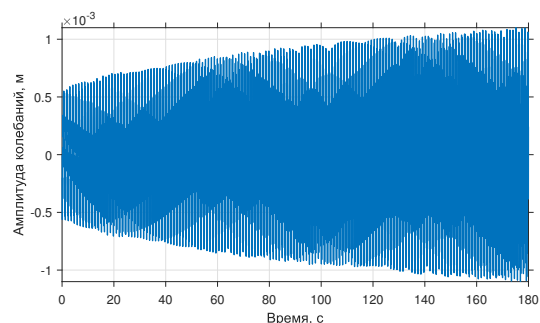
а)

б)

Рис. 1. Изменение амплитуды колебаний моста во времени при различном количестве пешеходов и времени запаздывания в вестибулярном канале: 1 – 150 чел. и  $\tau = 0$ ; 2 – 50 чел. и  $\tau = 0$ ; 3 – 150 чел. и  $\tau = 1$  с; шаг пешеходов меняется согласно следующему выражению а)  $7 \sin(5.4t)$ , б)  $10 \sin(5.4t) + 7 \sin(4.5t) + 10 \sin(6.4t) + 8 \sin(6t) + 5 \sin(4t)$



а)



б)

Рис. 2. Изменение амплитуды колебаний моста во времени при 150 пешеходах и а) уменьшении средней частоты пешехода до 4.6 рад/с; б) увеличении жесткости опор в 10 раз

## 4. Заключение

Предложенный новый подход моделирования системы мост-пешеход позволяет оценить критическое число пешеходов, способных раскачать мост, и соответствующую величину жесткости его опор. Результаты моделирования при снижении интенсивности шага пешеходов и шаг в противофазе с колебаниями моста демонстрируют низкий уровень амплитуды колебаний в пределах единиц миллиметра, что подтверждает адекватность модели системы, хотя она и требует уточнений параметров. Практическая применимость результатов исследования возможна не только в области проектирования и анализа динамики мостов, но и может быть распространена на другие конструкции, подверженные раскачке пешеходами.

## Список литературы

1. Dallard P., Fitzpatrick T., Flint A.J.A., Le Bourva S., Low A., Ridsdill R.M., Willford M. The London Millennium Footbridge // *The Structural Engineering*. 2001. Vol. 79, Issue 9. P. 17–33.
2. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Филиппова В.О. Насколько уникальны колебания Волгоградского моста? *Техническое регулирование в транспортном строительстве*. 2015. № 6(14). С. 81–91.
3. Belykh I., Bocian M., Champneys A.R., Daley K., Jeter R., Macdonald J.H.G., McRobie A. Emergence of the London Millenium Bridge instability without synchronization // *Nature Communications*. 2021. No. 12. P. 1–14.
4. Živanović S., Pavić A., Reynolds P. Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review // *Journal of Sound and Vibration*. 2005. Vol. 279. P. 1–74.
5. Chopra, A.K. *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering*. Englewood Clis, N.J.: Prentice-Hall, 1995. 763 p.
6. Wyatt T.A. Mechanisms of damping, in: *Proc. of the DOE and DOT TRRL Symposium on Dynamic Behaviour of Bridges*. Crowthorne, UK, May 19, 1977. P. 10–19.
7. Bachmann H., Pretlove A.J., Rainer H. Dynamic forces from rhythmical human body motions, in: *Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines*. Basel: Birkhauser, 1995. 234 p.
8. Hess R.A. A Model-Based Theory for Analyzing Human Control Behavior // *Advances in Man-Machine Systems Research* / Ed. by W.B. Rouse. JAI Press, Inc., 1985.
9. Ефремов А.В., Оглоблин А.В., Предтеченский А.Н., Родченко В.В. *Летчик как динамическая система*. Москва: Машиностроение, 1992. 336 с.
10. Han H., Zhou D., Ji T., Zhang J. Modelling of lateral forces generated by pedestrians walking across footbridges // *Applied Mathematical Modelling*. 2021. Vol. 89. P. 1775–1791.