

РАСЧЕТ ГРУНТОВОГО МАССИВА С ПОДКРЕПЛЕННЫМ ОТВЕРСТИЕМ ОТ ДЕЙСТВИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Гришин А.В. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

Исследуются волновые процессы, возникающие в системе, состоящей из грунтового массива и находящейся в его толще коробчатой конструкции от действия импульсной и гармонической нагрузки. Используется теория пластического течения с упрочнением.

Рассмотрим связанную систему, состоящую из грунтового массива и подкрепленного отверстия в виде коробчатой конструкции (рис. 1). Это транспортные, пешеходные, коллекторные тоннели, станции метрополитена, подземные автостоянки, путепроводы и т. д. В общем комплексе городских транспортных сооружений они занимают важное место. Кроме статических нагрузок на их работу очень часто влияют и динамические воздействия, которые могут быть вызваны различными причинами (технологией ведения строительных работ, эксплуатационными условиями, локальными природными или инженерно-геологическими процессами и т. д.).

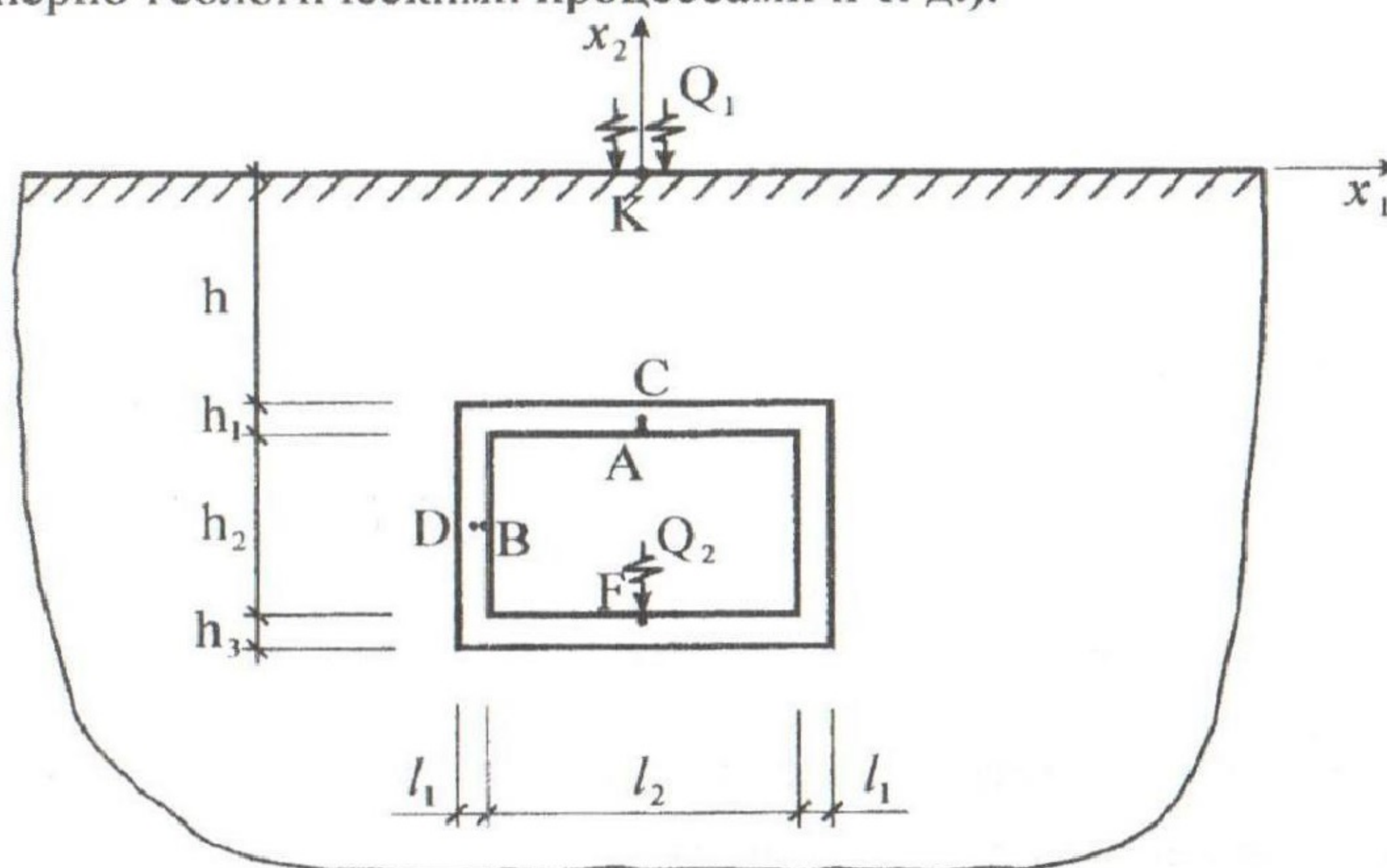


Рис. 1. Расчетная схема системы, состоящей из коробчатой конструкции и грунтовой среды

Исследуем волновые процессы, возникающие в системе от действия импульсного и гармонического нагружения с учётом упругопластических свойств материала подкрепления отверстия и

грунтового массива. Используем теорию пластического течения с кинематическим упрочнением [1]. В качестве функции нагружения для материала конструкции применяем условие Гензена [2]

$$3(\sigma_c - \sigma_p)\sigma_o + 3\sigma_i^2 - \sigma_p\sigma_c = 0, \quad (1)$$

а для грунтового массива – условие Кулона-Мора [3]

$$(\sigma_o - \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \sin \psi) \sin \varphi + \sigma_i \cos \psi - c \cos \varphi = 0. \quad (2)$$

Здесь: σ_o, σ_i, ψ - инварианты тензора напряжений [4]; σ_p, σ_c - пределы пластичности при растяжении и сжатии; c, φ - сцепление и угол внутреннего трения.

Методика исследования упругопластических задач при динамическом нагружении изложена в [5]. Здесь приведем только основные формулы:

- соотношение принципа виртуальной работы

$$\int_{\Omega} [\delta \varepsilon]^T \sigma d\Omega + \int_{\Omega} [\delta u]^T (\rho \ddot{u} + c \dot{u} - Q) d\Omega - \int_{S_q} [\delta u]^T q ds = 0; \quad (3)$$

- линейные соотношения Коши

$$d\varepsilon_{ks} = \frac{1}{2} (du_{k,s} + du_{s,k}); \quad (4)$$

- уравнения состояния для упругой и пластической областей системы

$$d\varepsilon_{ks}^{(e)} = C_{ksmn}^{(e)} d\sigma_{mn}, \quad (5)$$

$$d\varepsilon_{ks}^{(p)} = d\lambda f_{,\sigma_{ks}}, \quad d\lambda = \text{const} > 0. \quad (6)$$

Здесь: $\delta \varepsilon, \delta u$ - векторы виртуальных деформаций и перемещений; σ - вектор напряжений; ρ - плотности материалов; C - параметры демпфирования; Q, q - векторы заданных объемных и поверхностных сил; $u, \dot{u}, \ddot{u}$ - соответственно векторы перемещений, скоростей и ускорений; f - функция нагружения.

Уравнения состояния для упругопластических сред преобразуются к виду

$$\begin{aligned} d\sigma_{ks} &= D_{ksmn}^{(e)} d\varepsilon_{mn}, \text{ при } f = 0, \quad d'f \leq 0 \text{ или } f < 0; \\ d\sigma_{ks} &= D_{ksmn}^{(ep)} d\varepsilon_{mn}, \text{ при } f = 0, \quad d'f > 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где: $D_{ksmn}^{(e)}$ - упругие постоянные закона Гука; $D_{ksmn}^{(ep)}$ - упругопластические коэффициенты, определенные в [5].

Нелинейные исходные уравнения могут быть решены только численными методами. Для их реализации необходимо выполнить два основных этапа:

- дискретизацию исходных уравнений, как по времени, так и по области, занимаемой системой;
- построение итерационного процесса для определения решения с наперед заданной точностью.

Используя конечные и бесконечные элементы, в результате дискретизации для момента времени t_n получаем следующее матричное уравнение

$$M\ddot{\delta}_n + C\dot{\delta}_n + K(\delta_n)\delta_n = Q_n. \quad (8)$$

Здесь: M - матрица распределенных масс; C - матрица демпфирования; $K(\delta_n)$ - матрица жесткости; Q_n - вектор узловых нагрузок; $\delta_n, \dot{\delta}_n, \ddot{\delta}_n$ - соответственно узловые перемещения, скорости и ускорения.

Для определения решения (8) строится итерационный процесс, реализованный по неявному модифицированному методу Ньюмарка [5], который является безусловно устойчивым, что позволяет увеличить длину временного шага Δt и сократить время счета на ЭВМ. Подробное описание методики решения изложено в [5]. На её основе был разработан программный комплекс, который позволяет решать различные динамические задачи.

Численные результаты расчета получены при следующих исходных данных: $h_1 = h_3 = 0,3$ м; $h_2 = 2,4$ м; $h = 2$ м; $l_1 = l_3 = 0,3$ м; $l_2 = 4$ м. Механические свойства бетона конструкции принимаются

для В30, а арматура А-III. Для грунта: $E_o = 30$ МПа; $\mu_o = 0,3$; $\varphi_o = 28^\circ$; $c_o = 0,003$ МПа.

Пусть на поверхность грунта в течение 0,1 сек. действует динамическая нагрузка Q_1 интенсивностью 0,02 МПа. Исследуем её влияние на напряженно-деформированное состояние коробчатой конструкции. Полученные из расчета вертикальные колебания u_2 точки A , показанные на рис. 2. Из эпюры видно, что к концу фазы нагружения возникают наибольшие перемещения, далее происходит их спад и затем продолжение неупорядоченных колебаний с амплитудами до 0,004 см. Подобная картина наблюдается и для точек B, F . Например, эпюра горизонтальных колебаний точки B приведена на рис. 3. Можно отметить, что эпюры вертикальных колебаний для точек A и F почти совпадают как по форме, так и по величинам.

Колебания напряжений σ_{11} и σ_{22} в точках C и D показаны на рис. 4 и рис. 5. Наибольшие их амплитуды наблюдаются к концу фазы нагружения, затем происходит резкий скачок и почти полное затухание. Колебания напряжений заканчиваются примерно через 0,2 сек. после начала действия нагрузки.

Рассмотрим влияние динамической нагрузки Q_2 на напряженно-деформированное состояние коробчатой конструкции и грунтовой среды. Сравнивая эпюры, показанные на рис. 6 и рис. 7 можно отметить, что они подобны, но амплитуды колебаний точки K несколько больше, чем для точки A . По форме они похожи на ранее полученные эпюры u_2 в этих же точках.

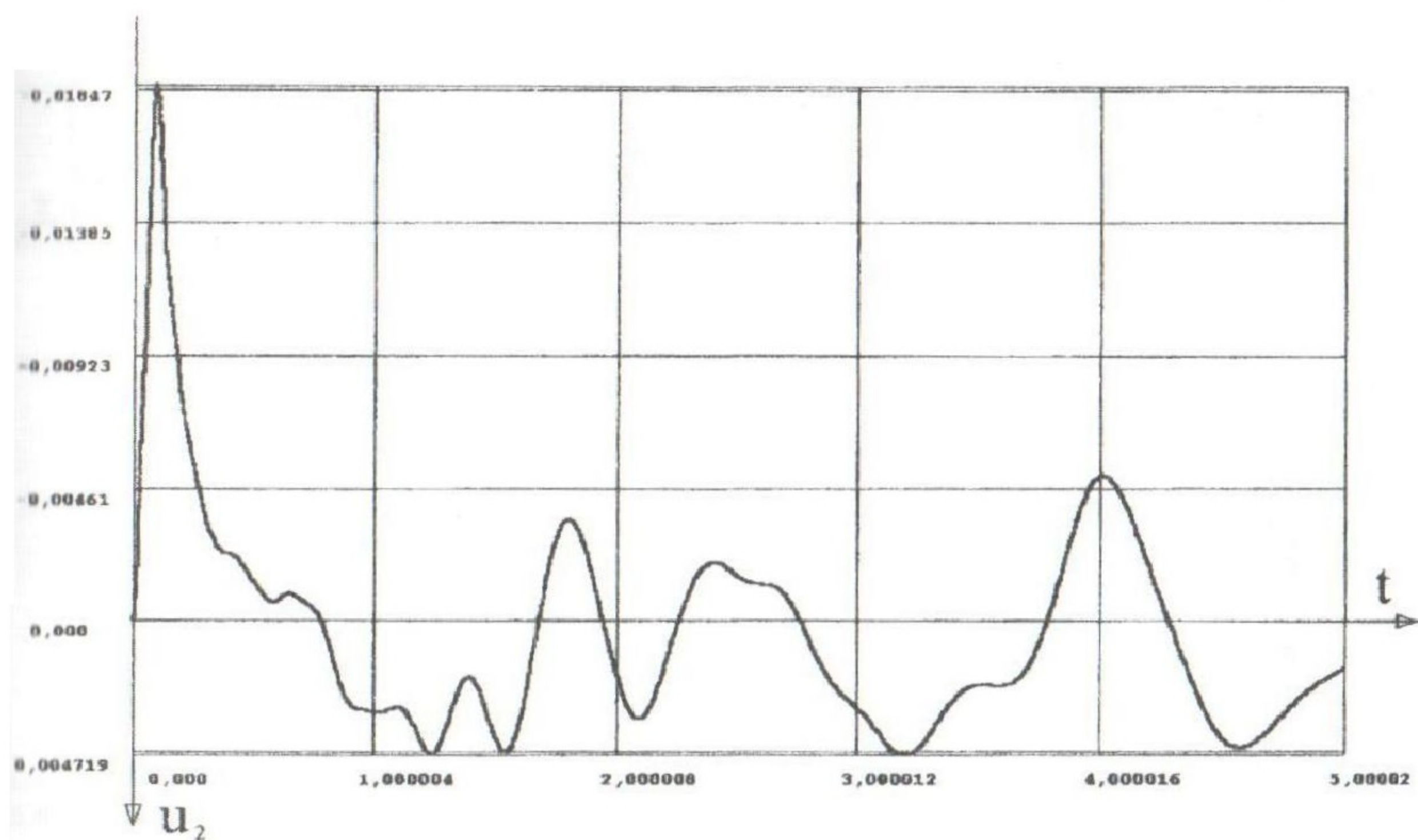


Рис. 2. Эпюра вертикальных колебаний u_2 точки A от действия нагрузки Q_1 (в см)

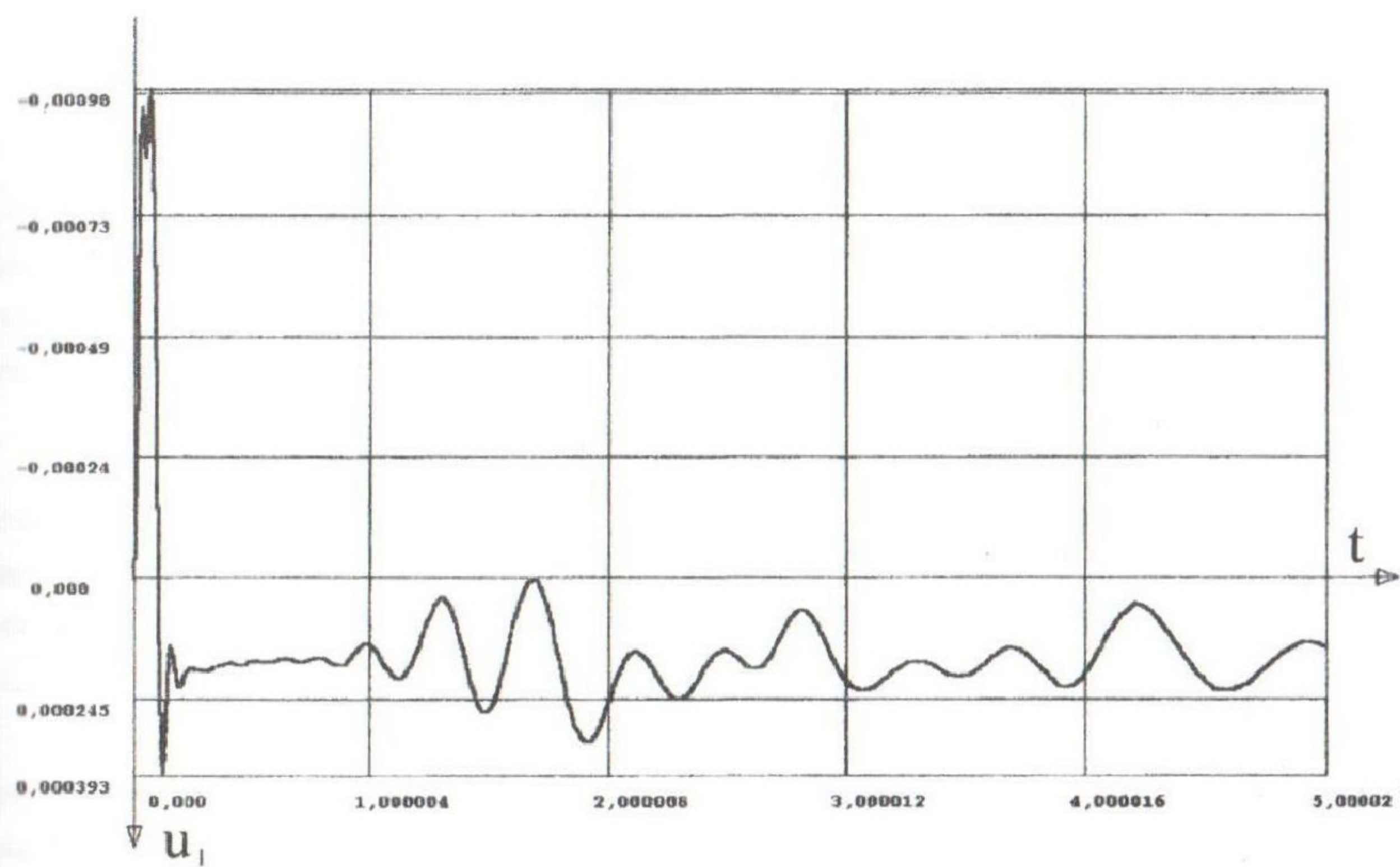


Рис. 3. Эпюра горизонтальных колебаний u_1 точки B от действия нагрузки Q_1 (в см)

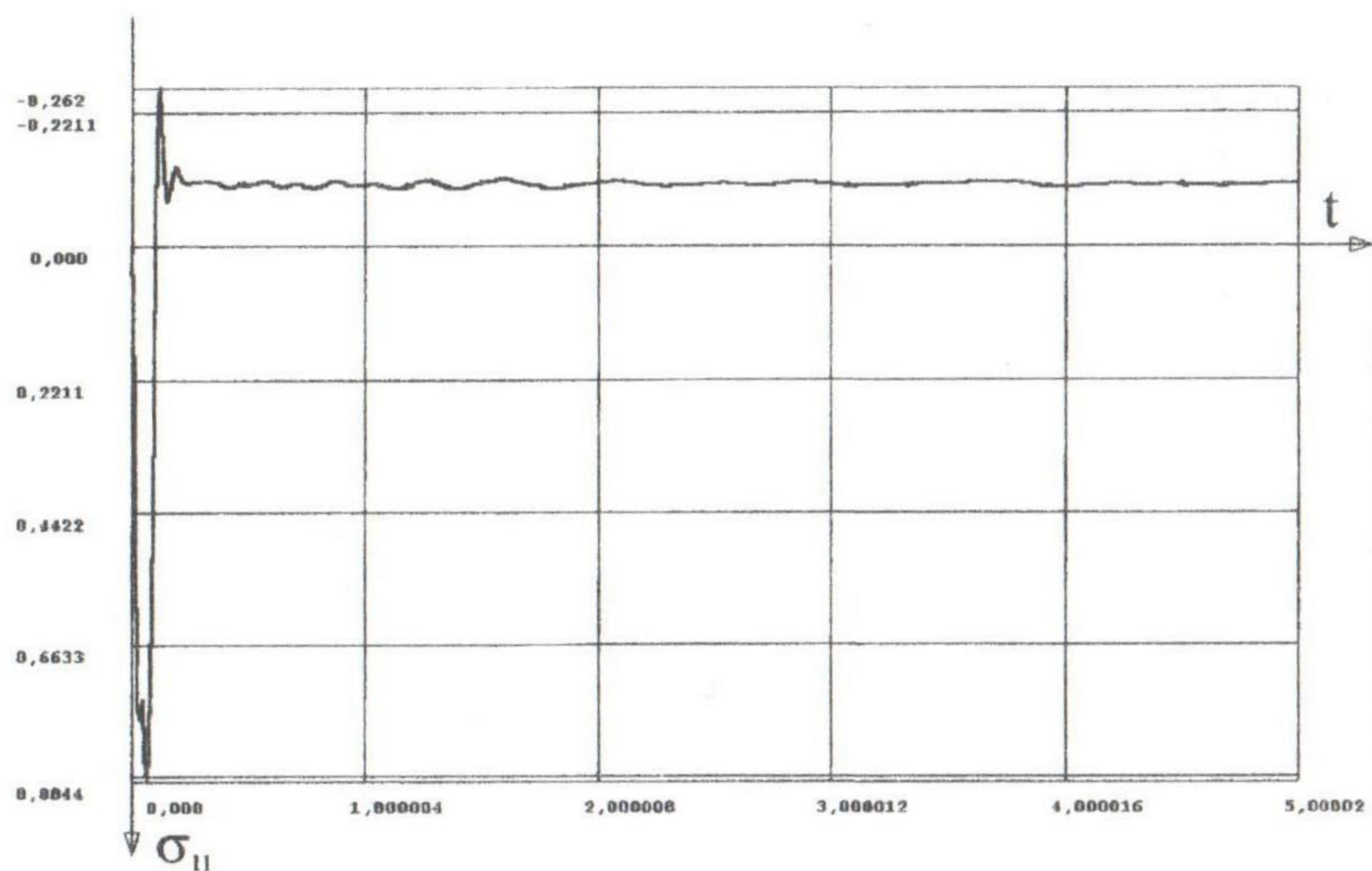


Рис. 4. Эпюра колебаний напряжений σ_{11} в точке C от действия нагрузки Q_1 (в 10 МПа)

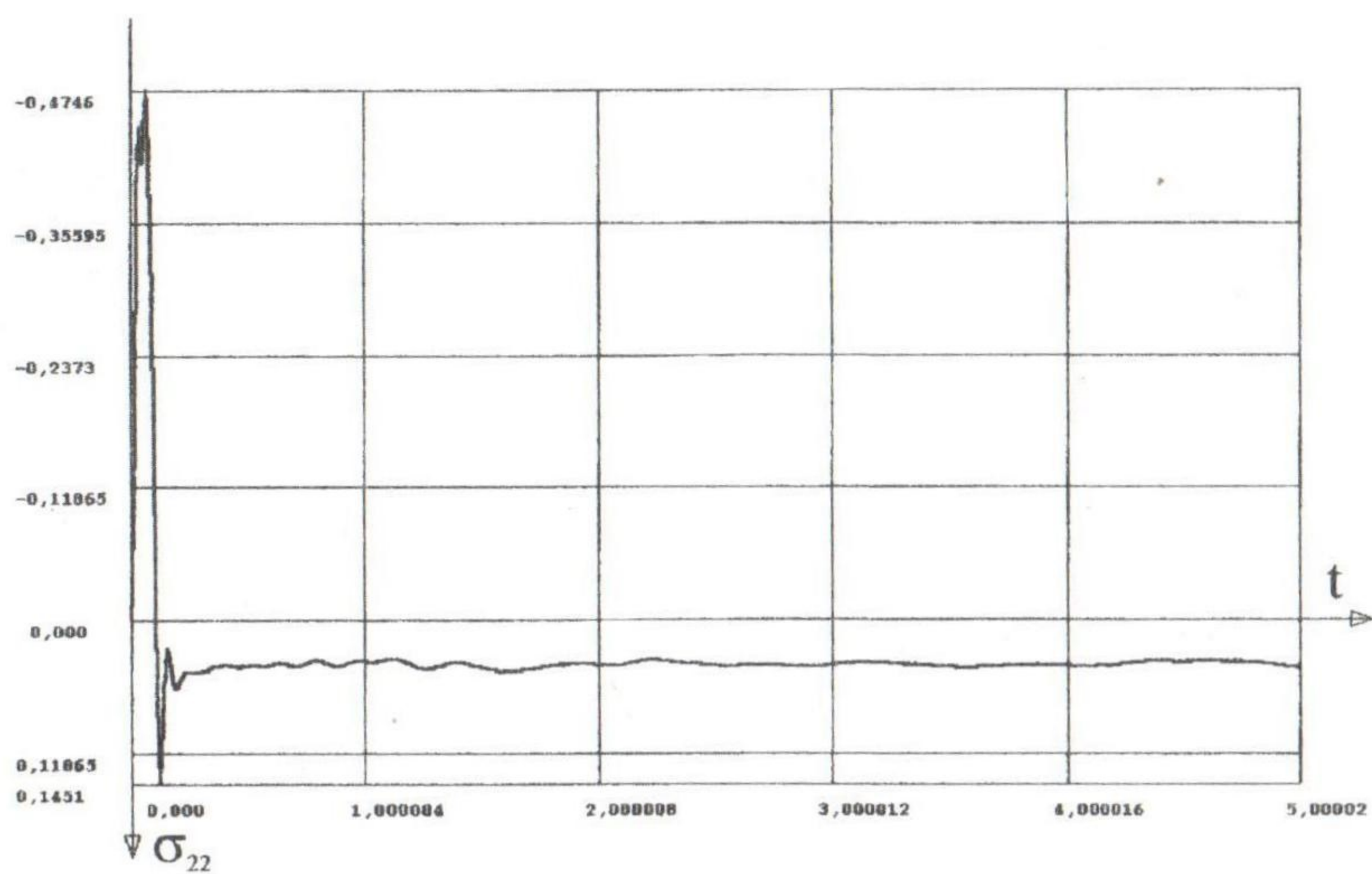


Рис. 5. Эпюра колебаний напряжений σ_{22} в точке D от действия нагрузки Q_1 (в 10 МПа)

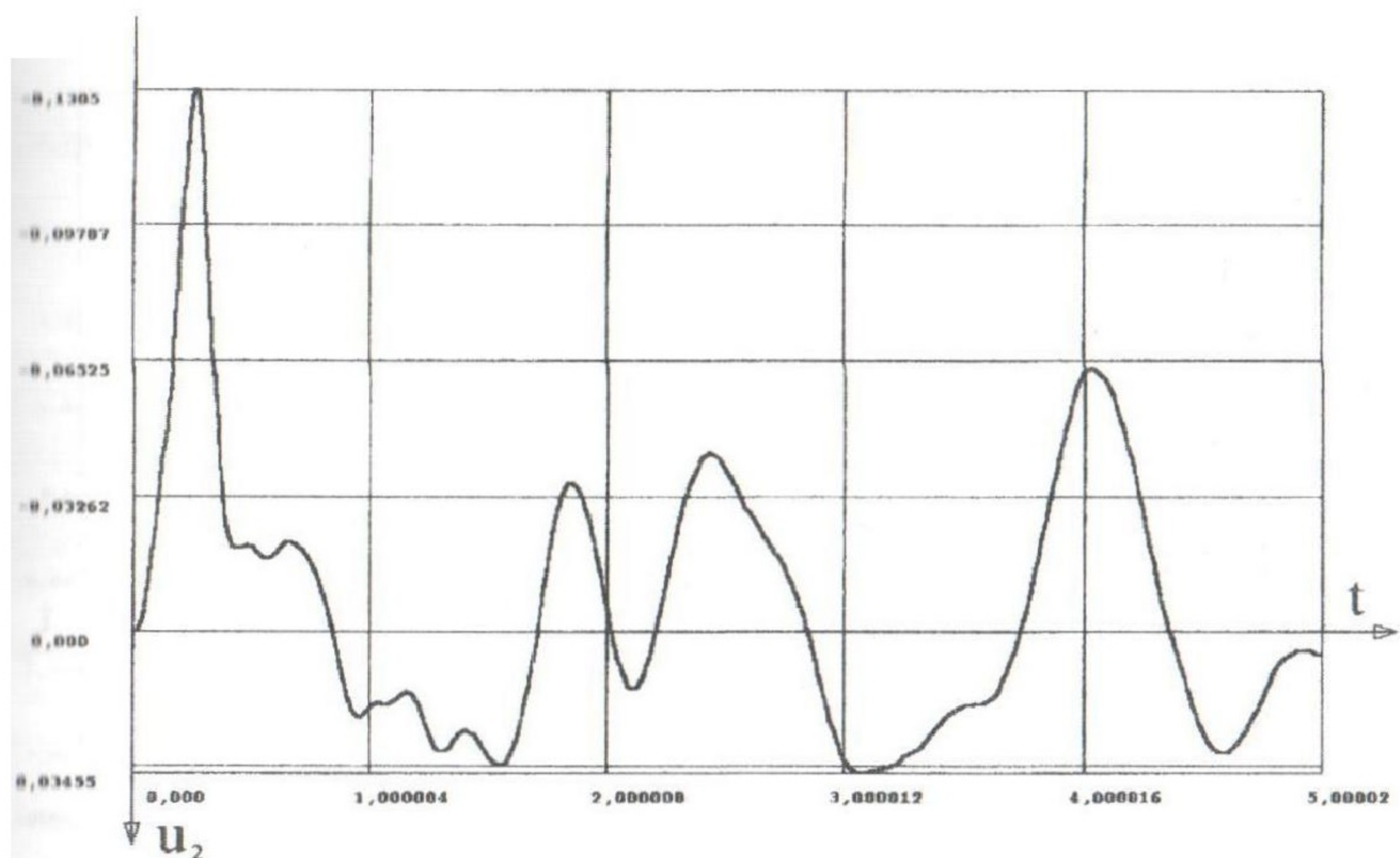


Рис. 6. Эпюра вертикальных колебаний u_2 точки A от действия нагрузки Q_2 (в см)

От нагрузки Q_2 наибольший размах колебаний напряжений σ_{11} точки C , приведенный на рис. 8, происходит в первые 0,3 сек., затем амплитуды резко уменьшаются и постепенно затухают. В этом случае наибольшие перемещения возникают как в конце фазы нагружения, так и в начале фазы свободных колебаний.

Пусть вместо импульсной нагрузки Q_2 приложена гармоническая нагрузка $a \sin \omega t$ при $a = 0,04$ МПа и $\omega = 5$ 1/сек. Учитываются затухающие свойства грунтовой среды и коробчатой конструкции по методу Релея. Расчеты показали, что в этом случае частота колебаний нагрузки и частота свободных колебаний системы близки друг к другу.

Из эпюры вертикальных колебаний точки K (рис. 9) следует, что размах колебаний резко увеличился до 5,353 см, что недопустимо для механизмов и сооружений, расположенных на поверхности грунтового массива. Был выполнен расчет без учета затухания колебаний. В этом случае их амплитуды оказались такой большой величины, которые заведомо привели бы к разрушению системы.

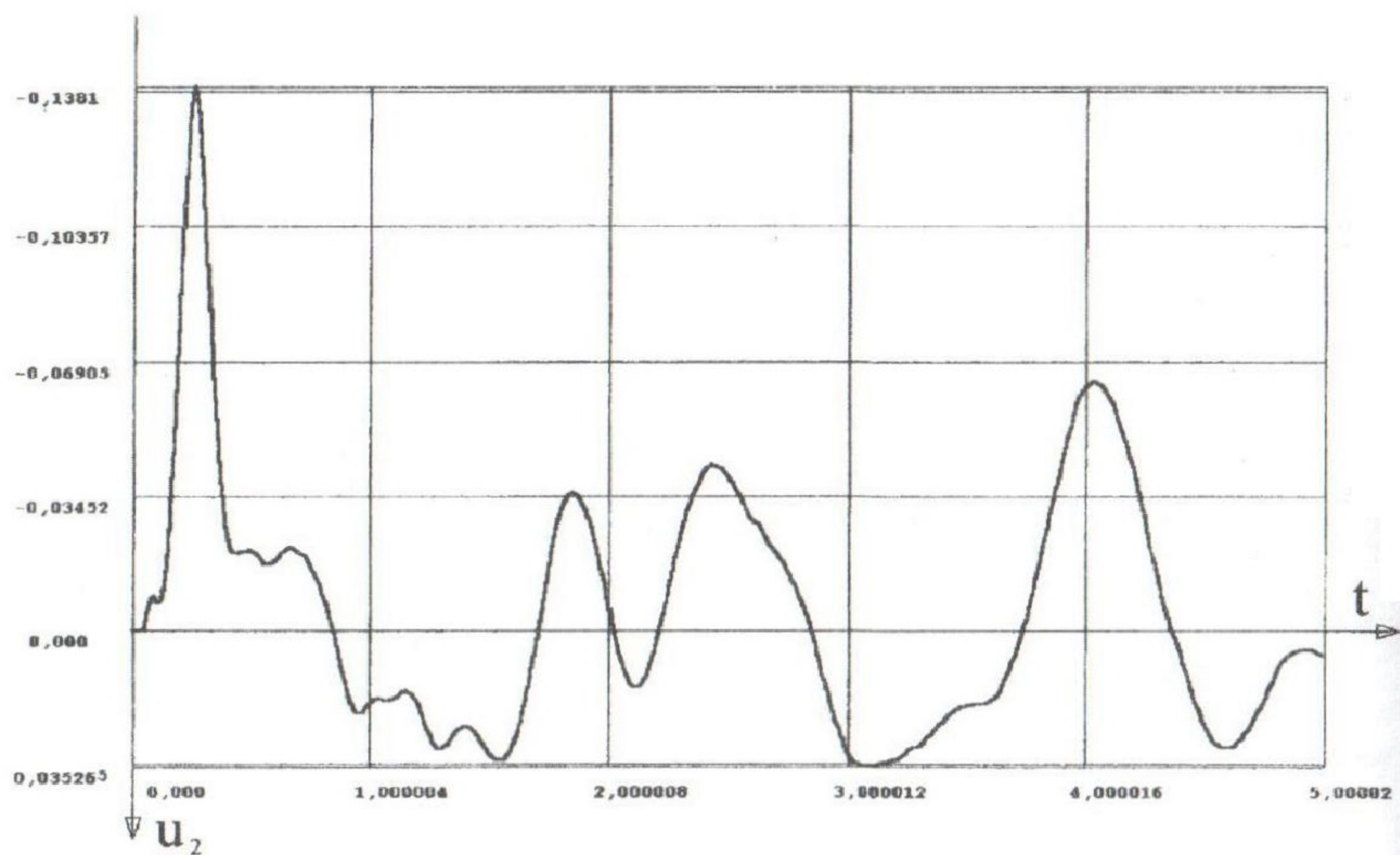


Рис. 7. Эпюра вертикальных колебаний u_2 точки K от действия нагрузки Q_2 (в см)

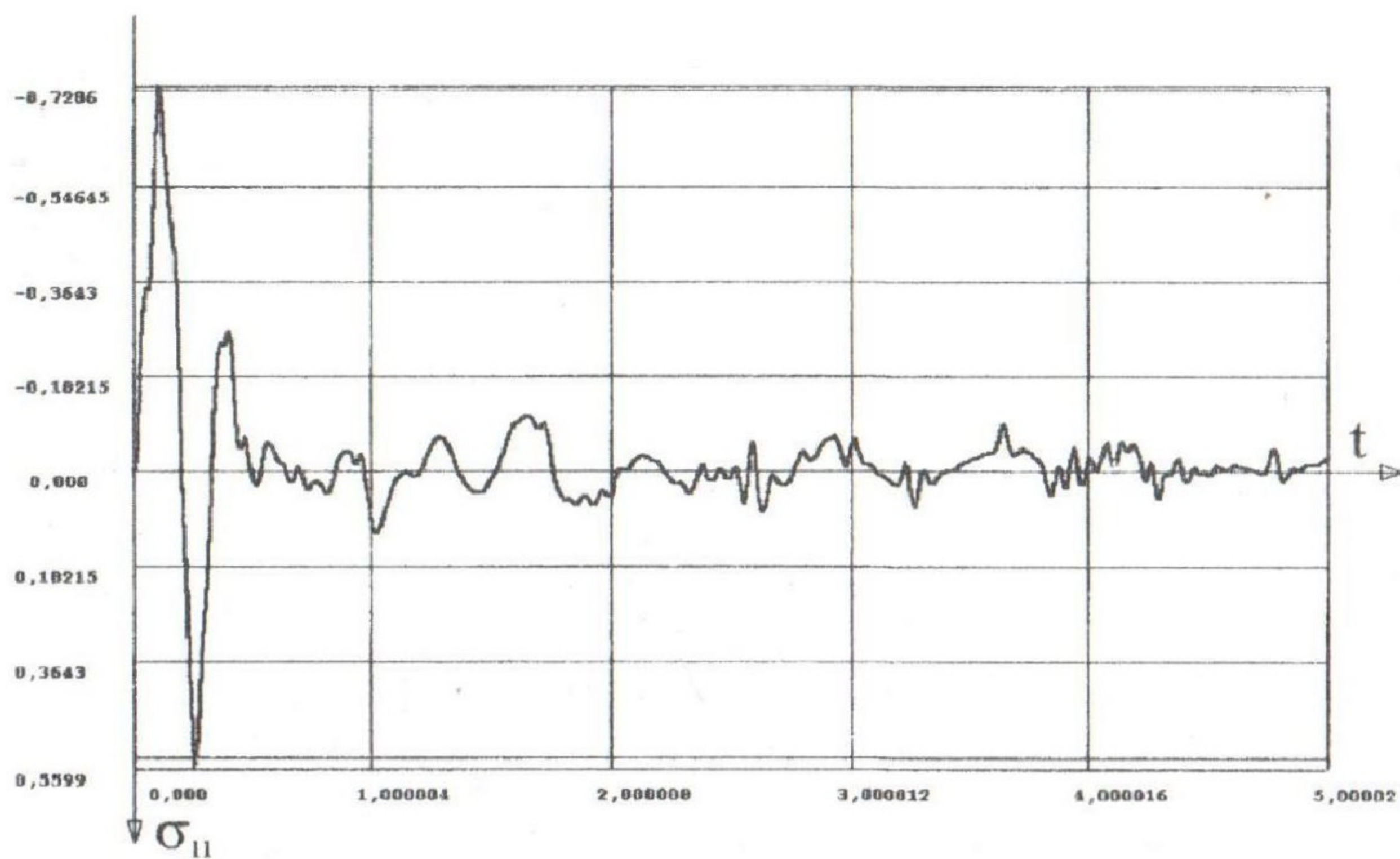


Рис. 8. Эпюра колебаний напряжений σ_{11} в точке C от действия нагрузки Q_2 (в 10 МПа)

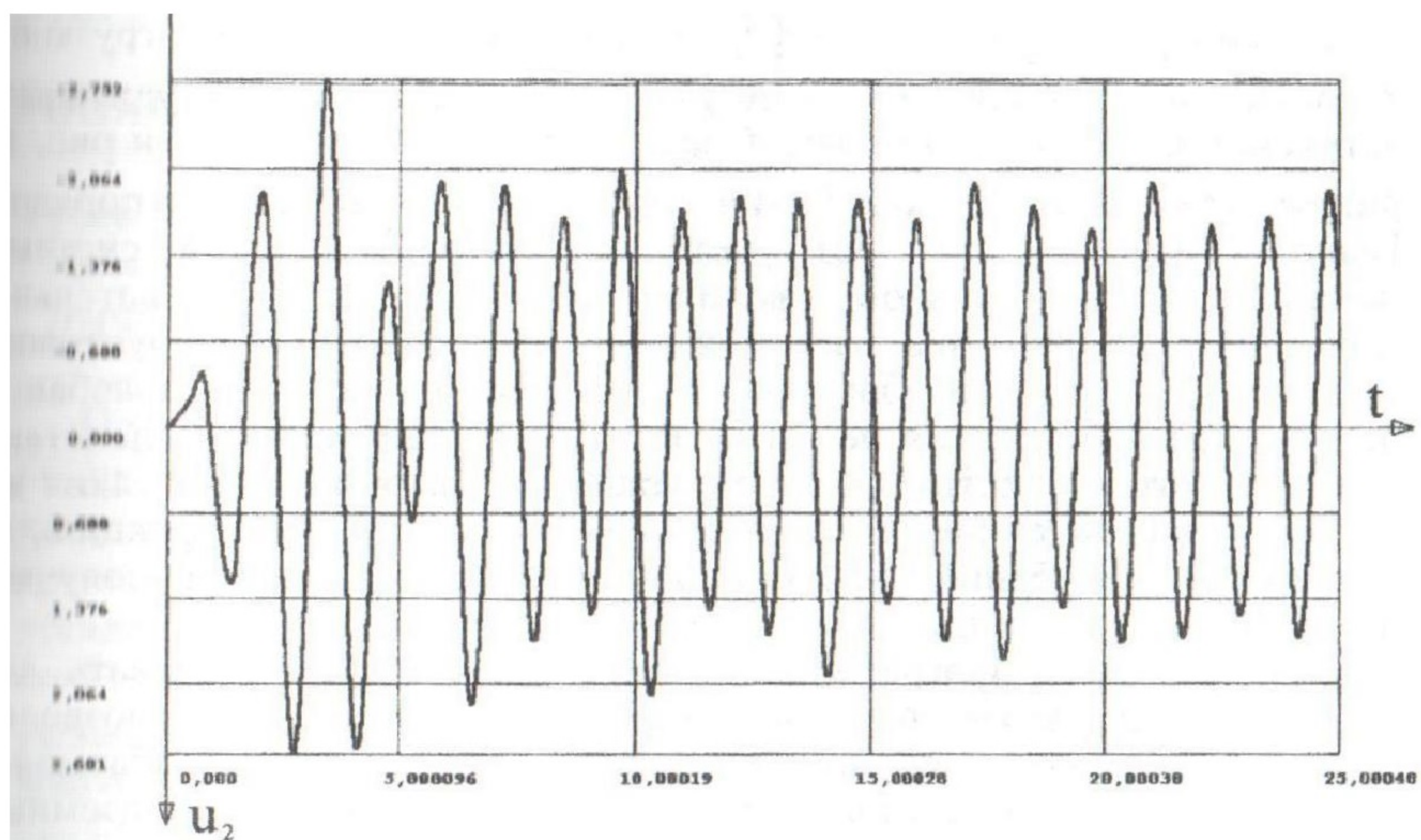


Рис. 9. Эпюра вертикальных колебаний u_2 точки K от действия гармонической нагрузки Q_2 (в см)

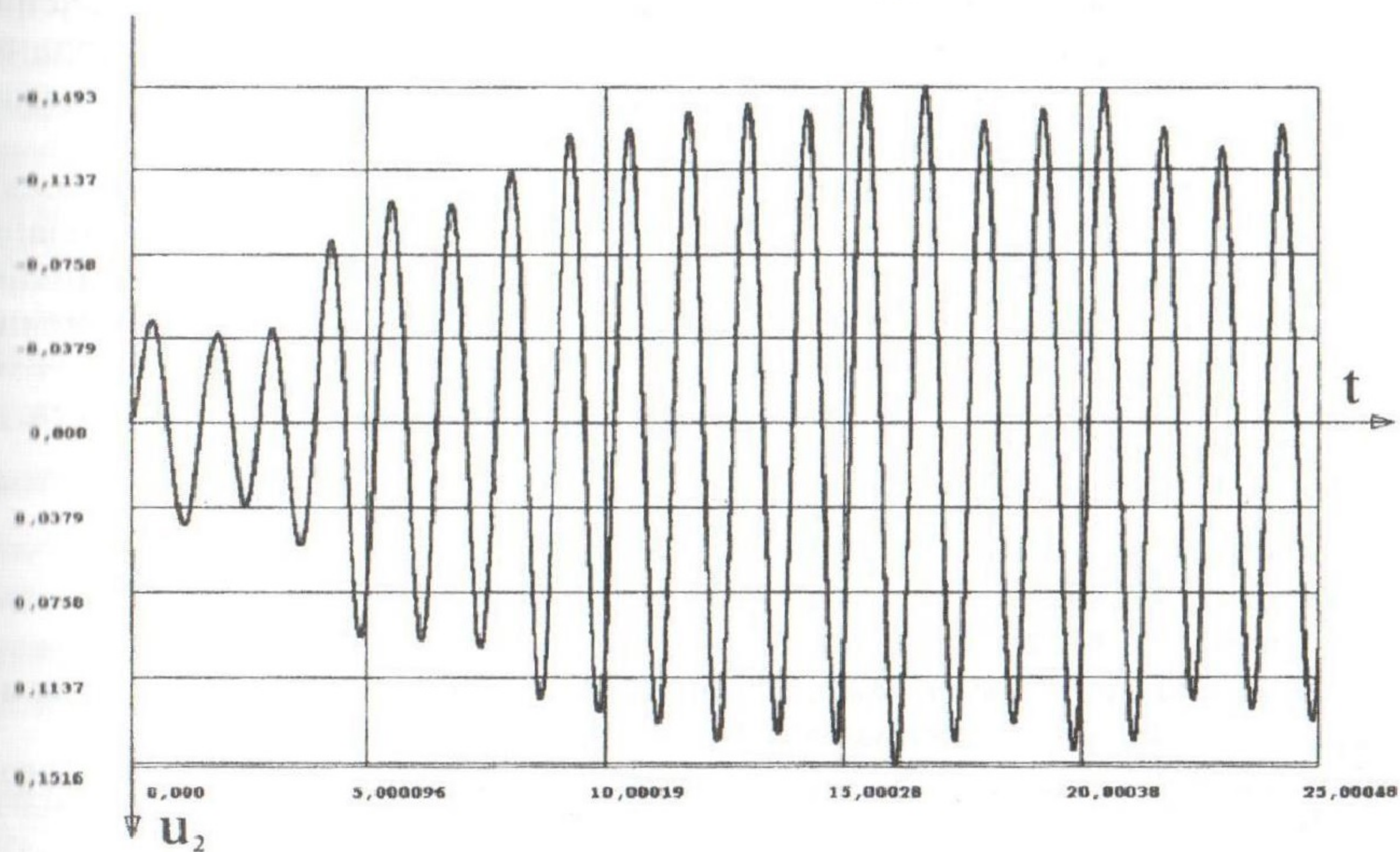


Рис. 10. Эпюра вертикальных колебаний точки A от действия гармонической нагрузки Q_1 (в см)

Рассмотрим случай, когда Q_1 является гармонической нагрузкой теми же параметрами, что и в предыдущем примере. Будем учитывать затухание колебаний системы. Сравнивая эпюры на рис. 9 и рис. 10 видим, что амплитуды колебаний точки A уменьшились на порядок. Выполненные расчеты без учета затухания колебаний системы показали незначительное увеличение амплитуд. Следовательно, гармоническая нагрузка расположенная на поверхности грунтового массива, с частотой близкой к частоте свободных колебаний подкрепления отверстия не вызывает катастрофических последствий для коробчатой конструкции. Если такая же нагрузка и при таких же условиях действует непосредственно на коробчатую конструкцию, то амплитуды колебаний резко увеличиваются и система получает большие деформации.

Предлагаемый программный комплекс можно использовать для выполнения расчетов при вариантном проектировании, что позволит при сравнительно небольших затратах времени разрабатывать оптимальные и надежные конструкции различных подземных транспортных сооружений. На основании полученных в работе результатов можно сделать следующие выводы:

1. При действии импульсных нагрузок от механизмов ударного действия в системе в конце фазы нагружения или в начале фазы свободных колебаний возникают скачки перемещений и напряжений, которые в несколько раз превышают их амплитуды при свободных установившихся колебаниях. Следовательно, это явление должно учитываться при проектировании конструкций.

2. При использовании механизмов, генерирующих гармонические колебания низкой частоты, близкой к частоте свободных колебаний конструкций, находящихся в грунтовой среде, в системе возникают волны с большими, но конечными амплитудами. Хотя они и конечны, так как учитываются затухающие свойства системы, но могут быть недопустимыми с точки зрения нормальной эксплуатации конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ивлев Д.Д., Быковцев Г.И. Теория упрочняющегося пластического тела. — М.: Наука, 1971, - 231с.
2. Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. — М.: Стройиздат, 1974. — 316с.
3. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. — М.: Недра, 1987. — 221с.
4. Новожилов В.В. Теория упругости. — Судпромгиз, 1958. — 370с.
- Гришин А.В., Дорофеев В.С. Нелинейная динамика конструкций, взаимодействующих с деформируемой средой. — Одесса, Астропринт, 2001. — 136с.