

$$dS = \frac{dE}{T_a} + \frac{P}{T_a} dV.$$

Назвемо величину  $\delta Q = T_a dS$  кількістю переданої тілу теплоти, а величину  $\delta A = PdV$  - роботою сил тиску, і одержимо

$$\delta Q = dE + \delta A.$$

Останнє, як відомо, рівняння називають першим началом термодинаміки або законом збереження енергії.

### Література

1. Беловол А.В. Законы механики и универсальные законы природы // Вестник ХНАДУ / Сб. науч. тр. - 2013. – Вып. 60. – с. 148-153.

Воропай Алексей Валериевич, к.т.н., доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»  
[voropay.alexey@gmail.com](mailto:voropay.alexey@gmail.com)

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ НАГРУЖЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ С УЧЁТОМ ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ**

Зачастую конструкторы сталкиваются с проблемой недостаточной информации о действии нагрузок на механические системы. Особенно серьезные проблемы возникают при нестационарном деформировании элементов конструкций. Закон изменения во времени этих нагрузок может оказывать заметное влияние на процесс нестационарного деформирования и, следовательно, на получаемые результаты расчётов. Поэтому чрезвычайно актуальными являются исследования, связанные с идентификацией динамических контактных нагрузений в процессе их косвенных измерений. Их восстановление производится на основе проявлений деформационного характера, регистрируемых, например тензометрическим методом.

По сути, указанная проблематика породила класс, так называемых, обратных нестационарных задач механики деформируемого твёрдого тела. Решение обратных задач идентификации неизвестных нестационарных нагрузений при обработке экспериментальных данных может существенно снизить стоимость и время исследований, а иногда частично или полностью заменить реальные исследования специальными вычислительными экспериментами.

Большинство обратных нестационарных задач сводится к интегральным уравнениям Вольтерра или их системам, решение которых является некорректной задачей математической физики. В настоящее время существует ряд методов решения некорректных задач. Наиболее широкое практическое применение получил метод регуляризации А. Н. Тихонова, который заключается во введении специального сглаживающего функционала. Согласно регуляризирующему алгоритму Тихонова [1] решение интегрального уравнения Вольтерра эквивалентно решению регуляризированной системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

При деформировании большинства реальных элементов конструкций происходит не чисто упругое, а вязкоупругое деформирование. В случае, когда вязкие (пластические) деформации малы – ими естественно пренебрегают. Однако, в ряде случаев, диссипацию энергии при механических колебаниях необходимо учитывать даже в задачах импульсного нагружения. Это позволит получать более точные и физически обусловленные значения внешних ударных нагрузок, вызывающих нестационарное деформирование, в отличие от чисто упругой постановки задачи идентификации. Следовательно, особый интерес представляет создание подхода, позволяющего учитывать диссипативные свойства деформируемых элементов конструкций на базе уже полученных к настоящему времени решений, построенных рамках теории упругости [2],

которые имеют вид интегралов свёртки:  $\varepsilon(t) = \int_0^t K_0(t-\tau) \cdot P(\tau) d\tau$ , где  $\varepsilon(t)$  – изменение деформации во времени, измеренное тензодатчиком в некоторой точке на внешней поверхности исследуемого объекта;  $P(t)$  – внешняя нестационарная нагрузка, вызывающая деформирование;  $K_0(t)$  – ядро интеграла, несущее, по существу, всю информацию об упруго деформируемом объекте.

В работах [3] показано, что для «упругих» решений, полученных в виде интегралов свёртки, можно модификацией ядер  $K(t)$  моделировать наличие внутреннего вязкого трения (модель Кельвина–Фойхта) и внутреннего гистерезисного трения (модель Бока–Шлиппе–Колара). Указанный подход основан на введении сглаживающих линейных интегральных операторов, получение которых базируется на использовании теоремы Эфроса:

$K_D(t) = \int_0^\infty \psi(t, \tau) \cdot K_0(\tau) d\tau$ , где  $K_D(t)$  – модифицированное ядро, учитывающее трение;  $\psi(t, \tau)$  – специальная функция, зависящая от модели внутреннего трения, коэффициента диссипации (логарифмического декремента затухания) и исследуемого промежутка времени. Подробнее о нахождении и видах функции  $\psi_i(t, \tau)$  можно посмотреть в [3].

При выполнении расчетов по идентификации ударных нагрузок всегда выполняется дискретизация, так как при вычислениях на ЭВМ исследуются не интегральные уравнения, а регуляризированные СЛАУ. Все численные

операции производятся не над ядрами, а над их дискретными аналогами. Численная реализация модификации дискретных аналогов ядер  $\mathbf{K}$ , полученных на базе решений в рамках теории упругости  $K_0(t)$ , для учета диссипации энергии осуществляется за счет умножения исходных векторов (матриц-столбцов) на специальным образом рассчитанные матрицы:  $\mathbf{K}_D = \mathbf{A}_D \mathbf{K}_0$ , где матрица  $\mathbf{A}_D$ , по сути, является дискретным аналогом сглаживающего линейного интегрального оператора.

Использование интегральных операторов позволяет рассчитывать модифицированные ядра для различных моделей внутреннего трения и коэффициентов диссипации (логарифмических декрементов затухания), которые даже для одного материала могут изменяться в зависимости от температуры или частоты нагружения, например, для асфальтобетонов или различных полимеров.

### Литература

1. Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. – М.: Наука. // Главная редакция физико-математической литературы, 1983. 200 с.
2. Идентификация нагрузок при импульсном деформировании тел. Монография в 2-х частях. Часть II / Е. Г. Янютин, А. В. Воропай, С. И. Поваляев, И. В. Янчевский. Харьков: Изд-во ХНАДУ. 2010. 212 с.
3. Воропай А. В., Григорьев А. Л. Использование сглаживающих интегральных операторов для учета внутреннего трения при нестационарном деформировании элементов конструкций // Механіка та машинобудування. Х: НТУ «ХПІ», 2018 – №1. С. 3-22.

Гнатенко Григорий Александрович, к.т.н., старший преподаватель,  
НТУ «ХПИ», gnatenko.kpi@gmail.com

### МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В АТТРАКЦИОНАХ СО СКОРОСТНЫМ СПУСКОМ НА НЕСУЩЕМ КАНАТЕ

Проведен анализ рабочих процессов в катальных немеханизированных аттракционах со скоростным спуском на несущем канате (рисунок 1). Рассмотрены различные типы механических моделей таких систем, проведена оценка их достоверности и соответствия.