

А. А. Ларин

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ
С УЧЕТОМ РАССЕЯНИЯ ЭНЕРГИИ В МАТЕРИАЛЕ
В ТРУДАХ УКРАИНСКИХ УЧЕНЫХ.
ОСНОВАНИЕ ШКОЛЫ Г. С. ПИСАРЕНКО**

Представлена історія розвитку розрахунків коливань механічних систем з урахуванням розсіяння енергії у матеріалі. Розглядається вклад у рішення цієї проблеми українських учених, у першу чергу Г. С. Писаренка та А. Д. Коваленка.

Ключові слова: теорія механічних коливань, розсіяння енергії, логарифмічний декремент коливань, петля гістерезису, турбінні лопатки.

Представлена история развития расчетов колебаний механических систем с учетом рассеяния энергии в материале. Рассматривается вклад в решение этой проблемы украинских ученых, в первую очередь Г. С. Писаренко и А. Д. Коваленко.

Ключевые слова: теория механических колебаний, рассеяние энергии, логарифмический декремент колебаний, петля гистерезиса, турбинные лопатки.

In article the history of development of the accounts of vibrations of mechanical systems subject to the energy dissipation in material is submitted. Its application for the decision of problems of Ukrainian scientists, first of all G. S. Pisarenko and A. D. Kovalenko is covered.

Keywords: theory of mechanical vibrations, dissipation of energy, logarithmic decrement of vibrations, hysteresis loop, turbine buckets.

Важнейшим вопросом теории механических колебаний является изучение влияния сопротивления на колебательные процессы. В [9] мы уже рассматривали развитие этого вопроса в первой трети XX века. В 1930-е гг. проблема исследований механических колебаний с учетом энергетических потерь в виде внутреннего неупругого сопротивления стала одной из важнейших в теории колебаний. Именно с ней связано становление школы академика НАН Украины Г. С. Писаренко, по инициативе которого был создан Институт проблем прочности АН УССР (ИПП), носящий ныне имя своего основателя [14, с. 11]. Он был бессменным директором института более 20 лет, а с 1988 г. до последнего дня жизни – почетным директором. Деятельность ИПП и Г. С. Писаренко изучена достаточно подробно, ей, в частности, посвящена коллективная монография [14], выпущенная в ИПП и посвященная 95-летию со дня рождения основателя школы и института – Г. С. Писаренко. Указанная работа охватывает деятельность ученого только с конца 1950-х гг. Первые же работы Георгия Степановича в области исследований колебаний с учетом энергетических потерь изучены недостаточно. Данная статья посвящается первым исследованиям, проведенным сотрудниками Института строительной механики АН УССР в 1940 г.

К концу 1930-х гг. большое практическое значение приобрели задачи о колебаниях лопаток паровых турбин. Густота спектра возбуждающих сил и частот собственных колебаний лопаточного аппарата и многообразие форм колебательных процессов вынудило опытным путем определять потери энергии – данные, необходимые для проведения вибрационных расчетов. В связи с этим, в рамках

комплексного решения проблем динамической прочности в Институте строительной механики АН УССР в 1940 г. проводились исследования рассеяния в материалах турбинных лопаток отдельно и в их пакетах. В рамках темы № 8 этой проблемой занимались старшие научные сотрудники, будущие академики АН УССР Г. С. Писаренко и А. Д. Коваленко. Отчеты по этой теме сохранились в архиве Института механики [15; 11].

Г. С. Писаренко выяснял зависимость логарифмического декремента колебаний в материале от величины нормальных напряжений в случае поперечных колебаний. Для этого создана оригинальная экспериментальная установка, позволяющая более точно определять диссипативные свойства материалов. Схема установки представлена на рис. 1 [15, с. 6]. В качестве образцов использовались прямоугольные стержни постоянного поперечного сечения $1,5 \times 26$ мм и 2×26 мм при рабочей длине образца 300 мм, изготовленные из стали марки 20 НБА (4А), предназначенной для турбинных лопаток. Чтобы избежать больших потерь энергии в зажимах образца, было решено отказаться от общепринятого консольного закрепления и испытывать образец в условиях чистого изгиба. Для этого образец подвешивался на двух струнах длиной около метра. Грузами служили цилиндрические стальные болванки с диаметром равным ширине образца и длиной 200 мм. На концах их были прорези, в которые винтами защемлялся образец. Точки подвеса системы были подобраны в узлах ее колебаний (приблизительно посередине груза), чтобы не изменить собственной частоты. Перед проведением эксперимента образец изгибался подобно луку с помощью струны, прикрепленной посередине образца. Для приведения системы в движение натяжная струна разрезалась, и, благодаря инерции масс грузов, закрепленных на концах образца, последний совершал свободные поперечные колебания. В результате проведенных экспериментов Писаренко пришел к следующим выводам:

1. Рассеяние энергии в материале не зависит от частоты колебаний.
2. Относительное рассеяние энергии в материале линейно зависит от величины напряжения и возрастает с увеличением напряжения.
3. Зависимость логарифмического декремента колебаний от напряжения в данном напряженном элементе при поперечном изгибе на основании опыта может быть выражена линейной зависимостью.
4. Рассеяние энергии на краю сечения в 4 раза больше среднего рассеяния по сечению образца, это значит, что величина логарифмического декремента на краю сечения в 1,33 раза больше его среднего значения по всему сечению.
5. Диапазон напряжений при которых исследовалось затухание колебаний (до 25 кг/мм^2) позволяет практически использовать полученные результаты при изучении демпфирования конструкций и деталей машин. В частности, это имеет большое значение в турбостроении, где вопросы демпфирования турбинных лопаток приобретают все большую актуальность.

Однако для лопаток турбин, объединенных в пакеты, доминирующее значение при демпфировании имеют не внутренние потери, а трение в сочленениях. Пакет представляет собой группу лопаток (5–7 шт.), скрепленных при помощи ленточного банджа и нескольких проволочных связей. Поэтому рассеяние энергии происходит не только за счет внутреннего трения, а в основном за счет внешнего трения в сочленениях пакета. До начала 1940-х гг. основной характеристикой рассеяния энергии при вибрации пакетов принимали логарифмический декремент колебаний

материала, из которого изготовлены лопатки. При этом декремент считали постоянным и не зависящим от напряженного состояния, амплитуды и формы колебаний лопаток, в то время как рассеяние энергии при вибрации пакетов паровых турбин не является постоянной величиной, а зависит от амплитуды и конструктивных факторов [11, с. 43]. В связи с этим А. Д. Коваленко провел исследование демпфирования при вибрации пакетов лопаток паровых турбин. Результаты докладывались на научной сессии Института строительной механики в феврале 1940 г. [7, ед. хр. 66, л. 7–10], на совещании по динамической прочности деталей машин в мае 1941 г. [1, с. 74; 6], а также приведены в отчете по теме за 1940 г. [11].

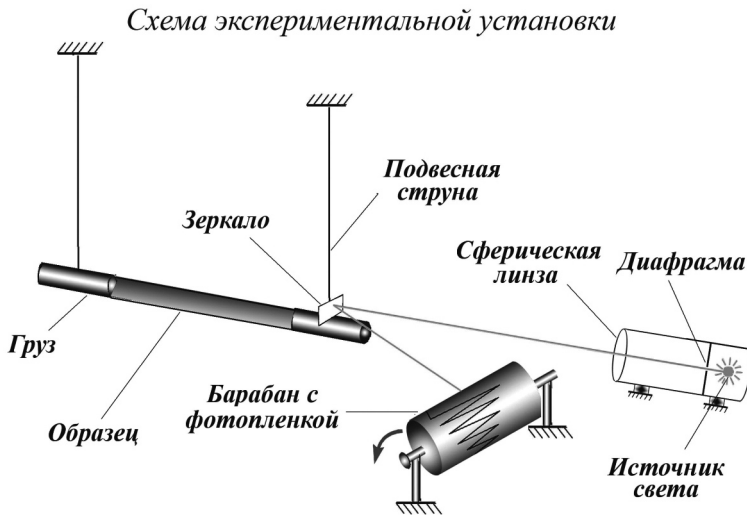


Рис. 1. Схема экспериментальной установки Г. С. Писаренко

В заключение следует отметить, что методика исследования затухания колебаний в материале применительно к турбостроительной стали может быть использована и для других материалов. —

2/5-1940 г. *Писаренко* Г.С. П И С А Р Е Н К О.

Заключительные строки отчета Г. С. Писаренко
по теме «Рассеяние энергии при вибрации» (1940 г.)

Исследования проводились на первой собственной частоте для не вращающихся пакетов, составленных из длинных лопаток. Изучалась зависимость рассеяния энергии от амплитуды прогиба и конструктивных факторов.

Испытаниям подвергались пакеты лопаток 17-й ступени турбины мощностью 6 000 кВт в условиях реального закрепления на колесе. Исследуемые пакеты состояли их семи лопаток постоянного сечения длиной 187,2 мм, связанных между собой бандажной лентой и проволокой [12, с. 53]. При этом использовалась фотозапись

кривых затухания колебаний, а также определялось динамическое усиление на режиме вынужденных колебаний, возбуждаемых механическим вибратором.

Для изучения влияния бандажа и проволоки сначала исследования проводились для полноценного пакета, затем проволока вырезалась, и исследовался пакет с одним бандажом, после чего удалялся бандаж, и испытывалась отдельная лопатка. Для установления вида функциональной зависимости между относительным рассеянием энергии и амплитудой прогиба вычислялось среднее значение логарифмического декремента колебаний и среднее относительное рассеяние энергии. В результате проведенных экспериментов Коваленко установил долю каждого элемента пакета лопаток в рассеянии энергии. Величина относительного рассеяния энергии в единичной лопатке приближается к соответствующему значению, найденному при исследовании образцов из стали, применяемой для изготовления лопаток паровых турбин. Следовательно, рассеяние энергии в единичной лопатке происходит, в основном, за счет внутреннего трения. Рассеяние энергии в пакете с бандажом состоит главным образом из внешнего трения месте заклепочного сочленения с бандажом (до 85 %). Вычисленный из энергетического баланса коэффициент внешнего трения оказался по своему значению близок к коэффициенту скользящего трения сухих металлических поверхностей. Работа сил трения в месте крепления бандажа при одной и той же амплитуде прогиба зависит также от угла поворота упругой линии и изгибающего момента лопатки. Следовательно, добавочная связь (проволока), уменьшая угол поворота упругой линии и изгибающий момент в месте крепления бандажа, одновременно вызывает уменьшение по абсолютной величине работы сил трения в заклепочном соединении бандажа. Таким образом, в пакете с бандажом и проволокой относительное рассеяние энергии может стать меньше, чем в пакете с одним бандажом. Но и в этом случае основная часть рассеяния энергии (80 %) получается за счет трения в местах крепления связей.

Важнейшим оказался вывод о том, применение специальных марок стали с большей способностью к рассеянию энергии, для изготовления пакетов лопаток паровых турбин практического значения не имеет, так как рассеяние энергии в пакетах главным образом определяется конструктивными факторами – числом, жесткостью крепления и конструкцией связей [7, с. 44]. Позже Г. С. Писаренко подтвердил результаты, полученные Анатолием Дмитриевичем в 1940 г. [12, с. 227].

9. На основе экспериментальных данных значительно уточняется расчет динамических напряжений. –

А. Д. Коваленко / А. КОВАЛЕНКО /

Заключительные строки тезисов А. Д. Коваленко к докладу на научной сессии Института строительной механики (февраль 1940 г.) по теме «Рассеяние энергии при вибрации лопаток паровых турбин»

В годовом отчете о научной деятельности института за 1940 г. отмечается, что по работе «Исследование прочности пакетов турболопаток в связи с демпфированием и усталостью стали» получена возможность уточнить расчет динамических напряжений, возникающих при вибрации лопаток, обеспечить этим более надежную

их работу, что представляет практический интерес для турбостроительных заводов [7, ед. хр. 65, л. 5]. Однако важнейшие для турбостроения исследования ученых Института строительной механики были прерваны войной.

Г. С. Писаренко вернулся к проблеме рассеяния энергии в материале при циклических нагрузках только в 1945 г. При этом он обратился к более точным зависимостям внутреннего сопротивления. Как показали многочисленные исследования, действие этого сопротивления выражается в так называемых гистерезисных потерях энергии деформации, т. е. оно носит неупругий характер. В связи с этим была принята гипотеза зависимости рассеяния энергии в материале от величины напряжения. В соответствии с ней при составлении уравнения колебаний необходимо вводить в рассмотрение петлю гистерезиса, ограниченную двумя пологими кривыми, соответствующими нагрузке и разгрузке. В местах сопряжения этих кривых наблюдается резкий излом петли, отчего ее форма не поддается описанию с помощью уравнения гладкой кривой. Тогда контур петли гистерезиса представляется двумя уравнениями, одно из которых относится к восходящей кривой, а другое к нисходящей. В местах же сопряжения ветвей должны удовлетворяться граничные условия. В соответствии с этим, колебания системы с рассеиванием энергии описывается не одним, а двумя уравнениями. Для большинства материалов, применяемых в машиностроении, ветви петли гистерезиса мало отклоняются от прямой, характеризующей закон Гука. Таким образом, данная задача относится к разряду слабонелинейных. На рис. 2 представлена типичная характеристика зависимости напряжения от деформации (петля гистерезиса).

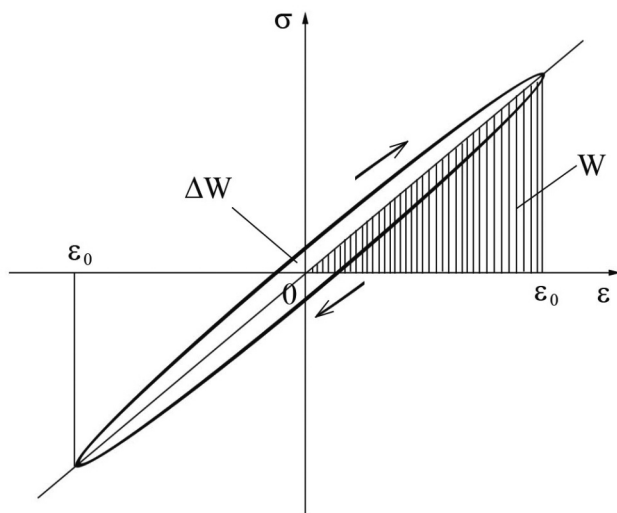


Рис. 2. Петля гистерезиса

Аналитическое описание петли гистерезиса при одномерном напряженном состоянии впервые предложено в 1938 г. академиком АН УССР Н. Н. Давиденковым в [10]. Однако применение полученной зависимости для анализа вынужденных колебаний упиралось в отсутствие соответствующего расчетного аппарата. Кроме того, что зависимость сопротивления от деформации нелинейна, она еще представляется и разными функциями для процессов нагружения и разгрузки. Давиденков высказал сомнение о возможности математического решения проблемы колебаний меха-

нических систем с учетом рассеяния энергии в материале. Именно это заявление и привлекло внимание Г. С. Писаренко к аналитическому решению проблемы внутреннего сопротивления [8, с. 68]. Он обратился за консультацией к одному из основателей нелинейной механики – Н. Н. Боголюбову, и вместе с ним пришел к выводу о возможности решения этой проблемы асимптотическими методами, основанными на разложении по степеням малого параметра. Этот подход для решения задачи, относящейся к классу слабонелинейных, оказался весьма эффективным. Существенным является и тот факт, что малый параметр в уравнении имеет определенный физический смысл. Проведенный анализ показал, что для получения необходимой точности при определении частоты и темпа затухания свободных колебаний, а также для определения амплитуд резонансных колебаний достаточно при решении задачи ограничиться первым приближением, что облегчает практическое использование метода [14, с. 813].

Кроме теоретической части, работа Писаренко включала и экспериментальные исследования. Для этой цели Георгий Степанович создал ряд оригинальных виброустановок с остроумными принципами работы. Эти установки позволили провести исследования демпфирующих свойств материалов при «чистых» видах деформации и при различных температурных условиях [12, с. 220–235]. С их помощью автор провел эксперименты, подтвердившие правильность теоретических выводов. В результате Г. С. Писаренко были получены фундаментальные результаты по вопросу, необходимость разрешения которого давно назрела.

Одной из первых работ по колебаниям с учетом рассеяния энергии были теоретические и экспериментальные исследования демпфирующего эффекта при поперечных колебаниях стержней, возбуждаемых аналогично лопастям винта, выполненное по заказу Научно-испытательного института ВВС Красной Армии в 1945 г. [7, оп. 1, ед. хр. 116, л. 4]. 29 июня 1948 г. Г. С. Писаренко успешно защитил докторскую диссертацию на тему «Вынужденные колебания упругих систем с учетом рассеяния энергии в материале» [2]. Официальными оппонентами были академик АН УССР Н. Н. Давиденков, Н. Н. Боголюбов и Г. Н. Савин, которые через месяц также были избраны академиками АН УССР [13, с. 74]. Один из них – Н. Н. Давиденков в своем отзыве отмечал: «Диссертант не ограничился решением задачи для простейшей системы с одной степенью свободы и однородным напряженным состоянием..., но и подробно разработал технически более важный и много более сложный случай изгиба консольного бруса и даже распространил этот случай на брусья переменной сечения, что имеет еще большее практическое значение» [8, с. 74–75]. Таким образом, Георгием Степановичем впервые были созданы теоретические основы для исследования колебаний упругих тел с учетом несовершенной упругости материала и заложены основы нового направления в теории колебаний, в результате развития которого образовалась новая научная школа. [14, с. 812].

15 сентября 1951 г. Г. С. Писаренко перевели в Институт черной металлургии АН УССР в качестве руководителя отдела прочности, организованного в рамках Лаборатории металлокерамики и специальных сплавов, преобразованной в институт в 1955 г. (с 1964 г. Институт проблем материаловедения АН УССР). Концентрируя внимание на исследованиях высокотемпературной прочности металлокерамических сплавов, Георгий Степанович не прекращал исследований по колебаниям механических систем с учетом рассеяния энергии [8, с. 80]. Об этом свидетельствует, например, госбюджетная тема «Исследование колебаний упругих систем с уче-

том рассеяния энергии», отчет по которой сохранился в отделе колебаний неконсервативных механических систем ИПП [2].

Эпоха НТР поставила целый ряд новых проблем перед теорией колебаний. Появился обширный класс машин, при работе которых из-за плотных спектров собственных частот и частот возбуждения избавиться от резонансов в их рабочем диапазоне стало невозможно. Стремление прогнозировать динамическое поведение машины на этапе ее проектирования потребовало более точного учета демпфирования при расчетах колебаний. В 1966 г. на базе сектора прочности Института проблем материаловедения по инициативе Георгия Степановича создан новый институт – ИПП [14, с. 11]. Там под руководством Писаренко создан отдел колебаний неконсервативных механических систем, основным направлением которого стало исследование влияния рассеяния энергии в материале на колебания механических систем с учетом воздействия других факторов, таких как температура, ударные нагрузки, различные конструктивные, технологические и эксплуатационные особенности. Одна из первых больших работ отдела, выполнявшаяся в начале 1970-х гг., была посвящена моделированию демпфирования и исследованию его влияния на колебания рабочих лопаток турбомашин применительно к реальным условиям их эксплуатации [4; 5]. Исследования Писаренко и его учеников помогли создать мощные высоконадежные энергетические блоки (котел – турбина – генератор – трансформатор) с давлением пара 240 атм. и температурой 540–560 С°, которые нашли применение на крупных электростанциях.

Важнейшим направлением деятельности отдела стало также изучение влияния температурного фактора на демпфирующую способность конструкционных материалов, что очень важно как для районов крайнего Севера с низкой климатической температурой, так и для деталей, эксплуатирующихся в условиях очень высоких температур. Этому направлению также посвящена одна из первых госбюджетных работ ИПП [3]. Ученики и последователи Г. С. Писаренко в дальнейшем развивали направление, открытое Георгием Степановичем, широко используя асимптотический подход при расчетах колебаний всевозможных упругих систем при разнообразном описании неупругого сопротивления материала и разных видах деформирования. Результаты исследований опубликованы Г. С. Писаренко и его учениками в десяти монографиях, одна из которых была издана в США в 1962 г. [14, с. 810]. Представители школы в течение 30 лет защитили по данному направлению шесть докторских и свыше 50 кандидатских диссертаций [8, с. 74].

Библиографические ссылки

1. **Давиденков Н. Н.** О рассеянии энергии при вибрациях / Н. Н. Давиденков // Журн. техн. физики. – 1938. – VIII. – Вып. 6. – С. 438–499.
2. Исследование демпфирования колебаний рабочих лопаток турбомашин применительно к реальным условиям их эксплуатации; Отчет по теме / ИПП АН УССР. – № ГР 72019671; Инв № Б389323. – К., 1974. – 206 с.
3. Исследование демпфирующей способности конструкционных материалов в широком диапазоне температур; Отчет по теме / ИПП АН УССР. – № ГР 69005996.– К., 1972.– 384 с.
4. Исследование колебаний упругих систем с учетом рассеяния энергии; Отчет по теме / Институт металлокерамики и специальных сплавов АН УССР. – К., 1962. – 138 с.
5. **Коваленко А. Д.** Исследование демпфирования при вибрации пакетов лопаток паровых турбин / А. Д. Коваленко // Сборник докладов по динамической прочности деталей машин (труды совещания). – М.–Л., 1946. – С. 52–63.

6. Ларин А. А. Исследование колебаний с учетом демпфирования в первой трети XX века (история вопроса) » / А. А. Ларин // Вестник НТУ «ХПИ» Транспортное машиностроение. – 2009. – Вып. 47. – С. 156–163.
7. Ларин А. А. Деятельность Института строительной механики АН УССР в области динамической прочности в 1930–1940-е гг. / А. А. Ларин // Вестник НТУ «ХПИ» История науки и техники. – 2009. – Вып. 53. – С. 67–79.
8. Писаренко Г. С. Вынужденные колебания упругих систем с учетом рассеяния энергии в материале : дис. ... докт. техн. наук / Г. С. Писаренко. – К., 1948. – 284 с.
9. Писаренко Г. С. Жизнь в науке / Г. С. Писаренко. – К., 1989. – 192 с.
10. Писаренко Г. С. Колебания упругих систем с учетом рассеяния энергии в материале / Г. С. Писаренко. – К., 1955. – 239 с.
11. Прочность материалов и конструкций / редкол.: В. Т. Трошенко (отв. ред.). – К., 2006. – 1076 с.
12. Разработка методов демпфирования колебаний рабочих лопаток турбомашин применительно к реальным условиям их эксплуатации; Отчет по теме / ИПП АН УССР. – № ГР 71021490. – К., 1970. – 252 с.
13. Фонды архива Института механики НАН Украины, оп. 1
14. Фонды архива Института механики НАН Украины, оп. 2 / Исследование демпфирования в связи с прочностью пакетов турболопаток; Отчет по теме за 1940 г., 45 л.
15. Фонды архива Института механики НАН Украины, оп. 2 / Рассеяние энергии при вибрации; Отчет по теме за 1940 г., 35 л.

Надійшла до редколегії 25.11.2009 р.

УДК 61(092) (477)

Т. О. Кисільова², В. С. Савчук¹

¹*Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара,*

²*Дніпропетровська медична академія*

ПЕРШИЙ РІК УКРАЇНСЬКОЇ РЕНТГЕНОЛОГІЧНОЇ АКАДЕМІЇ ТА РОЛЬ С. П. ГРИГОР'ЄВА В ЇЇ РОЗБУДОВІ

Досліджена організаційно-наукова діяльність С. П. Григор'єва та його роль у створенні та розбудові Української рентгенівської академії (УРА) у 1920 р. З'ясовані основні напрями його діяльності у рік заснування УРА. Виявлені та введені до наукового обігу нові архівні матеріали, використання яких дозволило з'ясувати та уточнити низку питань щодо УРА та життя і діяльності її першого директора С. П. Григор'єва.

Ключові слова: Українська рентгенологічна академія, 1920 р., С. П. Григор'єв, перший склад, архівні матеріали.

Исследована организационно-научная деятельность С. П. Григорьева и его роль в создании и устройстве Украинской рентгенологической академии (УРА) в 1920 г. Выяснены основные направления его деятельности в год основания УРА. Выявлены и введены в научный оборот новые архивные материалы, использование которых позволило выяснить и уточнить ряд вопросов, касающихся УРА, жизни и деятельности ее первого директора С. П. Григорьева.

Ключевые слова: Украинская рентгенологическая академия, 1920 г., С. П. Григорьев, первый состав, архивные материалы.

© Т. О. Кисільова, В. С. Савчук, 2010.