

მანქანათმშენებლობა

ცვლადი განივი კვეთის ღეროს დეფორმირების ექსპერიმენტული კვლევა თერმომექანიკური დატვირთვისას

ირაკლი თავაძე

tavadze.irakli@atsu.edu.ge

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

ქუთაისი, საქართველო

DOI:<https://doi.org/10.52340/atsu.2025.2.26.14>

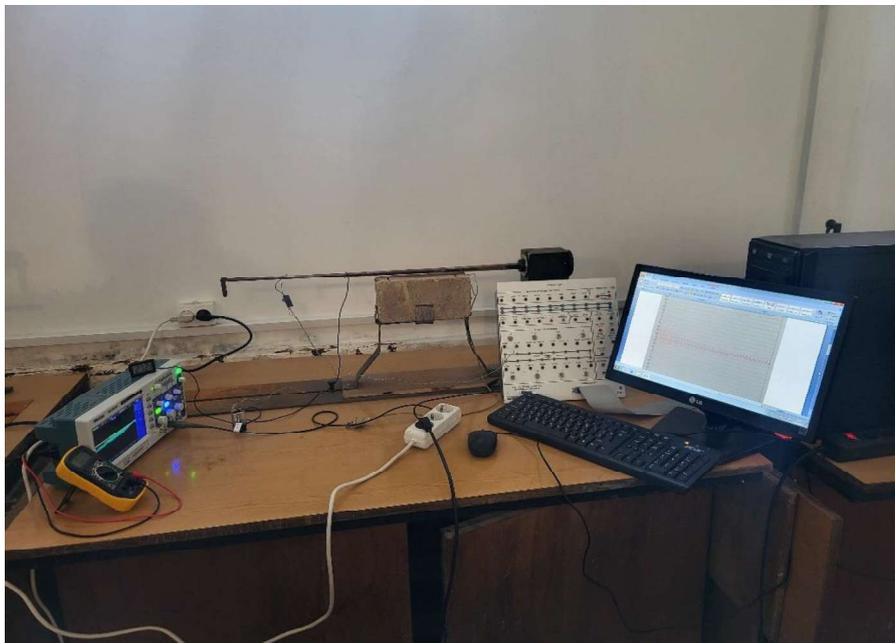
ნაშრომში მოცემულია წრფივად ცვლადი განივი კვეთის კონსოლური ღეროს დეფორმირების ექსპერიმენტული კვლევა თერმომექანიკური დატვირთვისას. აღწერილია ექსპერიმენტის სტენდი და ცდების ჩატარების თანმიმდევრობა. ცხრილებში მოცემულია გაზომვების შედეგები სტატიკური თერმომექანიკური დატვირთვისას. შესწავლილია კონსოლური ღეროს თავისუფალი რხევები. დადგენილია, რომ ტემპერატურის გაზრდით მცირდება საკუთარი რხევის სიხშირე.

საკვანძო სიტყვები: კონსოლური ღერო, ცვლადი განივი კვეთი, თერმომექანიკური დატვირთვა, ექსპერიმენტი

ექსპლუატაციის პერიოდში კონსტრუქციებში ღეროვანი ელემენტები ხშირად განიცდიან არაერთგვაროვანი ტემპერატურული ველისა და მექანიკური დატვირთვის ერთდროულ ზემოქმედებას. შესაბამისად, ღეროს დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის გაანგარიშებისა და სიმტკიცის შეფასებისათვის საჭიროა სითბოგამტარობისა და დეფორმირებადი მყარი სხეულის მექანიკის სასაზღვრო ამოცანის ამოხსნა ერთობლივი გადაწყვეტილების საფუძველზე. ამ ამოცანის ზოგადი, მრავალგანზომილებიანი ფორმულირება საკმაოდ რთულია. შედარებით მარტივი, გამოყენებითი მოდელის შემუშავება კი საჭიროებს გარკვეული ჰიპოთეზების შემოტანას. მიღებული თეორიული შედეგების სანდოობის დასადგენად აუცილებელია ექსპერიმენტული კვლევის ჩატარება, რაც საშუალებას იძლევა, ასევე, შემოწმდეს ჰიპოთეზების სამართლიანობა. ექსპერიმენტული კვლევების ძირითადი შედეგები კონსოლური ღეროს გადაადგილებებისა და ტემპერატურული ველის შესახებ წარმოდგენილია ნაშრომებში (Баїсарова 2015, 41-44; Baisarova 2015, 7).

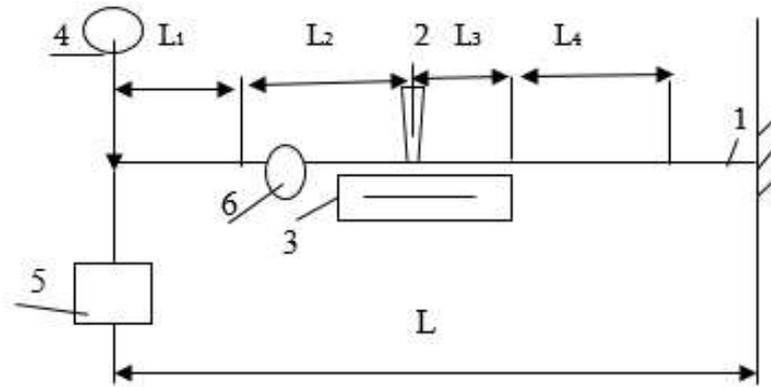
აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მასალათა გამძლეობის ლაბორატორიაში ჩატარდა ცდები ცვლადი განივი კვეთის კონსოლუ-

რი ღეროს დეფორმირების კვლევისათვის თერმომექანიკური დატვირთვის პირობებში (ნახ. 1).



ნახ. 1. ექსპერიმენტული სტენდი.

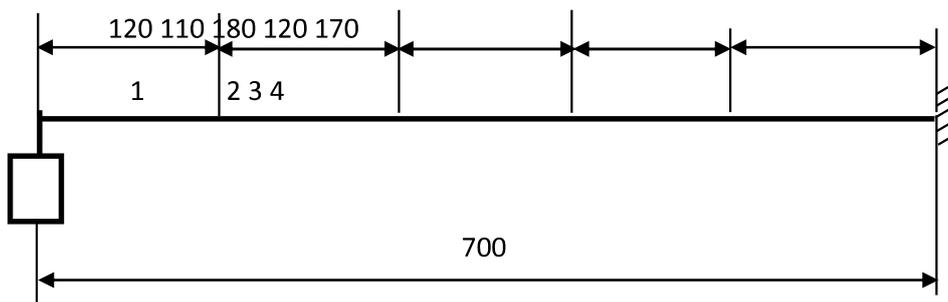
ი. თავაძე



ნახ. 2. ექსპერიმენტული სტენდის სქემა. 1 - კონსოლური ღერო, 2 - თერმომეტრი, 3 - გამათბობელი მოწყობილობა, 4 - საათური ტიპის ინდიკატორი, 5 - ტვირთი, 6 - პიეზო სენსორი.

ექსპერიმენტული სტენდის სქემა ნაჩვენებია მე-2 ნახაზზე. სტენდის გეომეტრიული ზომებია: $l = 700\text{მმ}$, $l_1 = 120\text{მმ}$, $l_2 = 230\text{მმ}$, $l_3 = 180\text{მმ}$, $l_4 = 270\text{მმ}$. განივი კვეთის სიგანე 24 მმ, ხოლო სიმაღლე ჩამაგრების კვეთში-12 მმ. ღეროს მასალა — ფოლადი ფლ.45. დამონტაჟდა გამათბობელი მოწყობილობა 200 ვატიანი სპირალით, რომელიც ათბობდა ღეროს ქვედა ზედაპირის 19 სმ სიგრძის მონაკვეთს. ტემპერატურის გაზომვა ხდებოდა ციფრული კონტაქტური თერმომეტრით TK-5.03., უნივერსალური ციფრული თერმომეტრის გარე ზონდით და ინფრაწითელი უკონტაქტო თერმომეტრით W-05, გადაადგილებები იზომებოდა საათური ტიპის ინდიკატორით. მექანიკური დატვირთვა ხორციელდებოდა 1კგ-იანი ტვირთით საკიდის წონაა 240გრ. სულ მექანიკური დატვირთვა შეადგენდა 12,45. საკიდარის წონის შესაბამისი გადაადგილება ტოლია 1,25მმ.

ტემპერატურის გაზომვა ხდებოდა ღეროს ზედაპირის ოთხ წერტილში, რომელთა განლაგებაც ნაჩვენებია მე-3 ნახაზზე.



ნახ. 3. ტემპერატურების გაზომვის წერტილების განლაგება 1,2,3,4 - გაზომვის წერტილები და შესაბამისი კოორდინატები (მმ).

3 წერტილში ტემპერატურა იზომებოდა კონტაქტური თერმომეტრით, 2 წერტილში ტემპერატურა იზომებოდა უნივერსალური ციფრული თერმომეტრის გარე ზონდით, 1 და 4 წერტილებში უკონტაქტო ინფრაწითელი თერმომეტრით.

ცდები ჩატარდა დატვირთვის ორი შემთხვევისთვის: პირველი – როცა ღერო მხოლოდ ქვედა ზედაპირის ნაწილზე ცხელდებოდა; მეორე – თერმომექანიკური დატვირთვისას. თერმომექანიკური დატვირთვისას, თავდაპირველად ღერო იტვირთებოდა თავისუფალ ბოლოზე გირით, შემდეგ კი ხდებოდა ქვედა ზედაპირის ნაწილის გათბობა. გათბობა გრძელდებოდა 8 წუთის განმავლობაში. ყოველ 40 წამში იზომებოდა ქვედა (გათბობადი) ზედაპირისა და ზედა ზედაპირის ტემპერატურა მოცემულ წერტილში, ასევე ღეროს თავისუფალი ბოლოს ვერტიკალური გადაადგილება.

1-ელ ცხრილში მოცემულია თითოეულ ცდაში ღეროს სიგრძეზე ტემპერატურების განაწილება გაზომვის წერტილებში.

ცხრილი 1. ტემპერატურის განაწილება ღეროს ზედაპირზე

ცდის ნომერი	წერტილების ნომერი			
	1	2	3	4
1	29.2	39.2	97	62
2	29.5	42	105	68.5
3	31.5	44.6	113	70
4	28	28	30	28

მასში მოცემული ტემპერატურები შეესაბამება კონტაქტური თერმომეტრით მე-3 წერტილში გაზომილ ტემპერატურებს.

მე-2 ცხრილში მოცემულია ღეროს თავისუფალი ბოლოს გადაადგილებები სტატიკური თერმომექანიკური დატვირთვისას.

ცხრილი 2. თავისუფალი ბოლოს ვერტიკალური გადაადგილება

N	თერმომექანიკური დატვირთვა		ინდიკატორის ჩვენებათა სხვაობა	გადაადგილება (მმ)
	ძალა (ნ)	ტემპერატურა °C		
1	10	97	522	5.22
2		105	526	5.26
3		113	532	5.32
4		30	504	5.04

ი. თავაძე

იმისათვის, რომ მივიღოთ 10ნ-ის შესაბამისი ჩალუნვა, საჭიროა მე-2 ცხრილში მოცემულ მნიშვნელობებს გამოვაკლოთ 1,25მმ. ოთახის ტემპერატურაზე თავისუფალი ბოლოს გადაადგილებები 12,4ნ დატვირთვაზე გაიზომა 4-ჯერ. ინდიკატორის ჩვენებათა სხვაობამ შეადგინა(მმ): 5,04; 5,06; 5,02; 5,02. აღებულ იქნა ჩვენებების საშუალო არითმეტიკული, რომელმაც შეადგინა 5,04მმ.

გამოკვლეულ იქნა ასევე ღეროს თავისუფალი რხევები თერმომექანიკური დატვირთვისას. ღეროს თავისუფალი რხევების დასადგენად გამოვიყენეთ (კონექტორი) (ნახ.1). ანალოგურ-ციფრული გარდამქნელი პიეზო სენსორიდან ხდება კონექტორის გავლით კომპიუტერთან დაკავშირება, კონექტორი შეერთებულია კომპიუტერთან მრავალარხიანი შლეიფით და კონექტორიდან წამოსული სიგნალები მიეწოდება პროცესორს, რომელშიც ჩატვირთულია ოთხ არხიანი ოსცილოგრაფი ავტომატური ჩაწერის ფუნქციით.

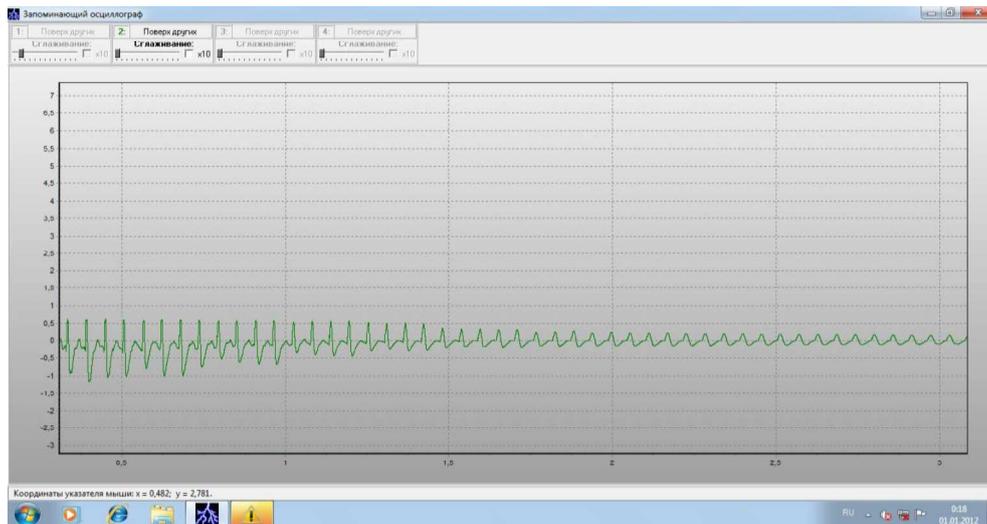
ღეროს თავისუფალი რხევების შესასწავლად საკუთარი სიხშირეების დადგენის მიზნით გადავხარეთ ღეროს თავისუფალი ბოლო და მყისიერად მოვაცილეთ დატვირთვა. ღერომ დაიწყო რხევითი მოძრაობა, პიეზო სენსორი მოცემულ რხევას გარდაქმნის ელექტრულ სიგნალებად, რომლებიც ფიქსირდება კონექტორის გავლით კომპიუტერში ვირტუალურ ოსცილოგრაფზე, ასევე პარალელურად, რხევების ჩაწერა ხდება Hantek 5000 ოსცილოგრაფზე.

შედეგად შესაძლებელი ხდება საკუთარი სიხშირეების შედარება ვირტუალურ ოსცილოგრაფსა და ჩვეულებრივ ოსცილოგრაფზე ჩაწერილ გაზომვების შედეგების მიხედვით.

საკუთარი რხევები შესწავლილ იქნა სხვადასხვა ტემპერატურაზე. მე-2 წერტილში და ტემპერატურის განაწილება შეესაბამება სტატიკური დატვირთვის დროს ჩატარებულ ექსპერიმენტებს 1-ელ, მე-3 და მე-4 წერტილებში.

ჩაწერილ იქნა საკუთარი რხევები სხვადასხვა ტემპერატურის პირობებში, როდესაც მე-2 წერტილში ტემპერატურა შეადგენდა შესაბამისად: 28°C; 47°C; 57°C; 58°C; 62°C.

მე-4 ნახაზზე ნაჩვენებია ღეროს თავისუფალი ბოლოს მოძრაობის გრაფიკი 28°C ტემპერატურაზე.



ნახ. 4. ღეროს თავისუფალი რხევები ჩაწერილი პიეზოგადამწოდით 28°C-ზე.

ექსპერიმენტით მიღებული შედეგების ანალიზი აჩვენებს, რომ შერჩეული სტატიკური თერმომექანიკური დატვირთვისას ტემპერატურის გაზრდა 80°C-ით იწვევს თავისუფალი ბოლოს გადაადგილების ზრდას 6%-ით. ტემპერატურის გაზრდით მცირდება ღეროს საკუთარი რხევის სიხშირე, რაც ხარისხობრივად ადასტურებს (Kikvidze 2021, 1-6; Kikvidze 2021, 7-15) ნაშრომებში, რიცხვითი გაანგარიშებებით მიღებულ შედეგებს მულტივი განივი კვეთის კონსოლური თერმომექანიკური ღეროსათვის.

ლიტერატურა

- Baisarova, G., Kikvidze, O. 2015. „Experimental investigation of beam at thermo mechanical loading“, *VI ANNUAL MEETING OF THE GEORGIAN MECHANICAL UNION*, 30.09, 4.10.2015: 7.
- Kikvidze, O.G., Sakhvadze, G.G., Sakhvadze, G.Z. 2021. „Numerical calculation of the natural vibration frequencies of thermo-elastic rods taking into account the effect of the temperature gradient“, *Journal of Physics: Conference Series*, 1901(1), 012116, 2021: 1-6.
- Kikvidze, O.G., G.Zh. Sakhvadze, E. K. Minadzea, and R. T. Brzhanov. 2021. „Developing a Calculation Technique for Thermoelastic Rods under Dynamic Loading“, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. Volume 50, № 7, 2021: 7-15.

Байсарова, Г.Г., Киквидзе, О.Г. 2015. Экспериментальное исследование перемещений и температурного поля в стержне при термомеханическом нагружении// *GEORGIAN ENGINEERING NEWS*, No.3, 2015: 41-44.

კვლევა განხორციელდა „შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის“ მხარდაჭერით [გრანტის ნომერი - PHDF-23-3216].

Machine Building

Experimental Study of the Deformation of a Variable Cross-Section Rod under Thermomechanical Loading

Irakli Tavadze

tavadze.irakli@atsu.edu.ge

Akaki Tsereteli State University

Kutaisi, Georgia

DOI:<https://doi.org/10.52340/atsu.2025.2.26.14>

The paper presents an experimental study of the deformation of a cantilever bar with a linearly varying cross-section under thermomechanical loading. The experimental setup and the sequence of the tests are described. The measurement results under static thermomechanical loading are given in tables. The free vibrations of the cantilever bar are investigated. It is determined that the natural vibration frequency decreases with increasing temperature.

Keywords: *Cantilever Rod, Variable Cross-Section, Thermomechanical Loading, Experiment*

During operation, rod elements in structures are often subjected to simultaneous action of non-uniform temperature fields and mechanical loads. Therefore, analyzing their stress–strain state and strength requires solving a coupled boundary problem of heat conduction and solid mechanics. Since the general multidimensional formulation is complex, simplified applied models are used, based on certain assumptions. To verify theoretical results and assumptions, experimental studies are necessary. Key findings on cantilever rod displacements and temperature fields are presented (Байсарова 2015, 41-44; Baisarova 2015, 7).

At Akaki Tsereteli State University Strength of Materials Laboratory, experiments were conducted on the deformation of variable cross-section cantilever rods under thermomechanical loading (Fig. 1).



Fig. 1. Experimental Setup.

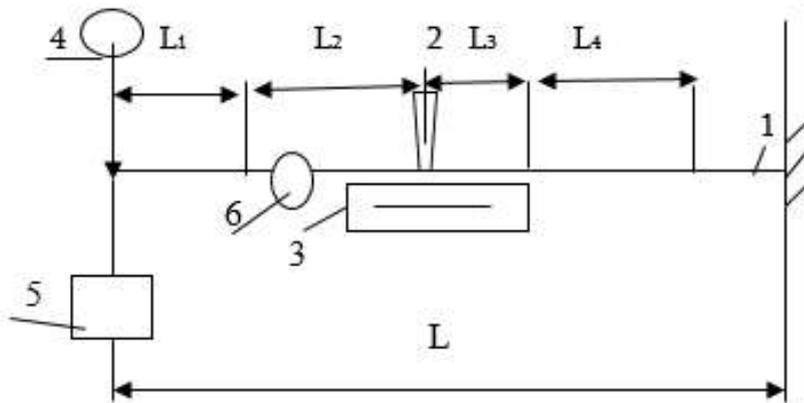


Fig. 2. Experimental Stand Diagram. 1 - Cantilever Rod, 2 - Thermometer, 3 - Heating Device, 4 - Dial Indicator, 5 - Load, 6 - Piezo Sensor.

The experimental stand layout is shown in Fig. 2. Its dimensions are: $l = 700$ mm, $l_1 = 120$ mm, $l_2 = 230$ mm, $l_3 = 180$ mm, $l_4 = 270$ mm. The cross-section width is 24 mm, and the height at the fixed end is 12 mm. The rod material is steel St.45. A 200 W spiral heater was installed to heat a 190 mm section of the lower surface. Temperature was measured using a TK-5.03 digital contact thermometer, a universal digital thermometer with external probe, and a W-05 infrared thermometer. Displacements were recorded with a dial indicator.

Mechanical loading was applied by a 1 kg weight (plus 240 g hanger), giving a total force of 12.4 N, with the hanger alone producing a 1.25 mm displacement.

Temperature was measured at four surface points of the rod, as shown in Fig. 3

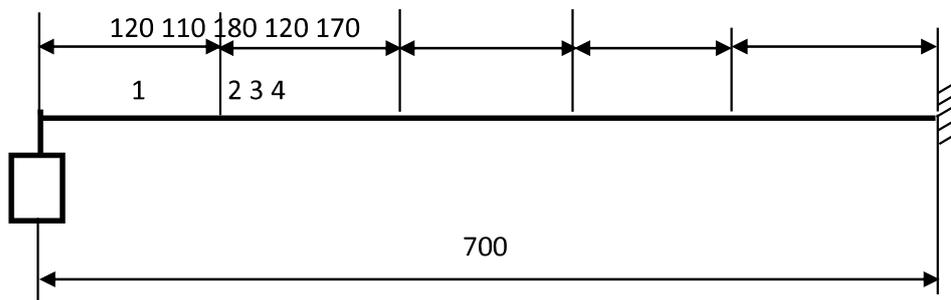


Fig. 3. Arrangement of Temperature Measurement Points 1, 2, 3, 4 – Measurement Points with Corresponding Coordinates (mm).

In three points, temperature was measured with a contact thermometer; at point 2 with a universal digital thermometer with an external probe; and at points 1 and 4 with a non-contact infrared thermometer.

Tests were conducted under two conditions: first, heating only the lower surface section of the rod; second, under thermomechanical loading. For the latter, the rod was initially loaded at the free end with a weight, then the lower surface section was heated for 8 minutes. Every 40 seconds, temperatures at the heated lower and upper surfaces were recorded, along with the vertical displacement at the free end. Table 1 shows the temperature distribution along the rod at the measurement points for each test.

Table 1. Temperature Distribution on the Rod Surface

Test Number	Point Number			
	1	2	3	4
1	29.2	39.2	97	62
2	29.5	42	105	68.5
3	31.5	44.6	113	70
4	28	28	30	28

The temperatures shown correspond to those measured at point 3 with the contact thermometer.

Table 2 shows the displacements at the free end of the rod under static thermomechanical loading.

Table 2. Vertical Displacement at the Free End

N	Thermomechanical loading		Difference in Indicator Readings	Displacement (mm)
	Force (N)	Temperature (°C)		
1	10	97	522	5.22
2		105	526	5.26
3		113	532	5.32
4		30	504	5.04

To obtain the deflection corresponding to a 10 N load, 1.25 mm was subtracted from the values in Table 2. At room temperature, free-end displacements under a 12.4 N load were measured four times: 5.04, 5.06, 5.02, and 5.02 mm. The average value was 5.04 mm.

Free vibrations of the rod under thermomechanical loading were also studied using the connector shown in Fig. 1. The piezo sensor converted vibrations into electrical signals transmitted via the connector to a computer, where a four-channel virtual oscilloscope recorded them automatically. Parallel recordings were made with a Hantek 5000 oscilloscope.

Free-end vibrations were initiated by quickly removing the load from the free end. Natural frequencies were determined and compared between the virtual and conventional oscilloscopes. Vibrations were studied at different temperatures. Temperature distribution at point 2 matched static-load experiments at points 1, 3, and 4.

Vibrations were recorded at point 2 for temperatures of 28°C, 47°C, 57°C, 58°C, and 62°C. Fig. 4 shows the free-end vibration graph at 28°C.

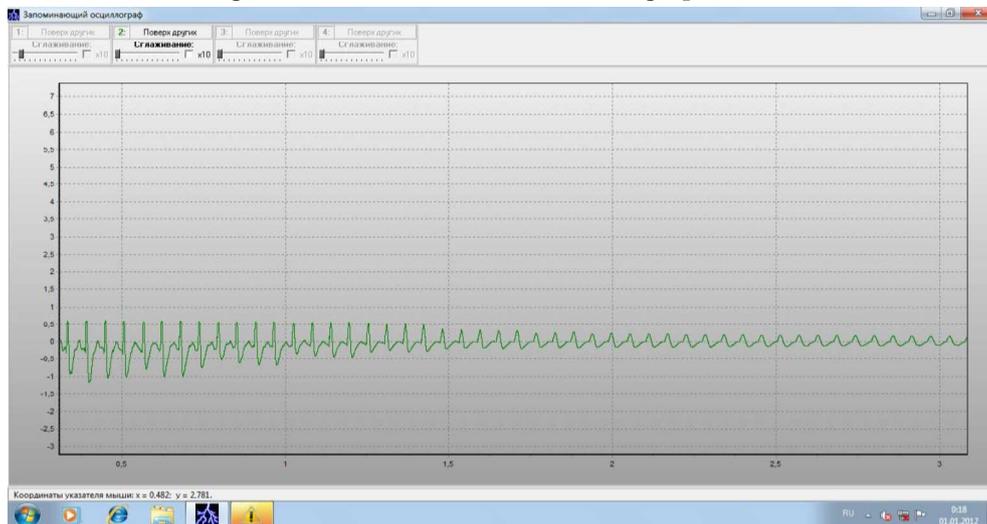


Fig. 4. Free-End Vibrations of the Rod Recorded by the Piezo Transducer at 28°C.

Analysis of the experimental results shows that under the selected static thermomechanical loading, increasing the temperature by 80°C causes the free-end displacement to increase by 6%. An increase in temperature also reduces the rod's natural frequency, that confirms the results obtained by numerical calculations in works (Kikvidze 2021, 1-6; Kikvidze 2021, 7-15) for a constant cross-section cantilever thermomechanical bar.

This work was supported by “Shota Rustaveli National Science Foundation of Georgia” (SRNSFG) [Grant number - PHDF-23-3216].