

Шестая Международная конференция

# "Триггерные эффекты в геосистемах"

21-24 июня 2022 / Москва

## ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ПОДВИЖКИ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ТИПА СТИК-СЛИП

**Казначеев Павел Александрович** (ст.н.с., ИФЗ РАН),  
**Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А.В., Соболев Г.А.** (ИФЗ РАН),  
**Кох В.В., Краюшкин Д.В.** (ИФЗ РАН, НИУ МЭИ)

**Москва, ИДГ РАН, 2022**

# Введение

Развитие современных средств регистрации и обработки сигналов позволяет переходить на новый уровень при проведении экспериментов, связанных с разрушением горных пород. Это относится как к экспериментам, проводимым по новым методикам, так и к экспериментам, проводимым по классическим методикам.

Лабораторные эксперименты по созданию модельных разломов в виде слайдер-моделей из двух и более блоков горных пород предполагают моделирование сейсмического события как срыва - быстрой подвижки одного из блоков [Ohnaka, 1973]. Условия эксперимента предполагают приложение как минимум двух усилий – основного (параллельного направлению подвижки) и бокового (перпендикулярного направлению подвижки).

При проведении таких экспериментов измеряются как минимум величины двух типов - пространственные (расстояния) и силовые (усилия). В качестве дополнительных могут измеряться другие физические величины, сопровождающие или предваряющие процесс подвижки (например, акустическая эмиссия, электропроводность и др.). Развитие аппаратуры по регистрации расстояний и усилий открывает новые возможности по определению эволюции этих величин.

# Цели и задачи

- Оценка возможностей анализа кинематических параметров подвижек типа стик-слип в слайдер-модели из двух наклонных блоков на основе измерений смещения с высоким пространственным и временным разрешением.
- Оценка энергетического баланса процесса подвижки по этим данным.
- Пробные эксперименты в режиме стик-слип с «мягким» постоянным боковым поджатием (пружинный динамометр жесткостью около  $5.6 \cdot 10^6$  Н/м) и «мягким»/«жестким» основным нагружением (нагружение с/без пружинного динамометра жесткостью около  $5.6 \cdot 10^6$  Н/м).

## Сопутствующие задачи:

- Опробование лазерного дальномера MicroEpsilon optoNCDT ILD-2300-100.
- Оценка возможности использования современных LVDT датчиков смещения, разработка аппаратуры и программного обеспечения для захвата сигналов для них.
- Оценка возможностей и проблем синхронизации разных сигналов (система лазерного датчика, система LVDT-датчиков, система регистрации АЭ, система регистрации усилия).

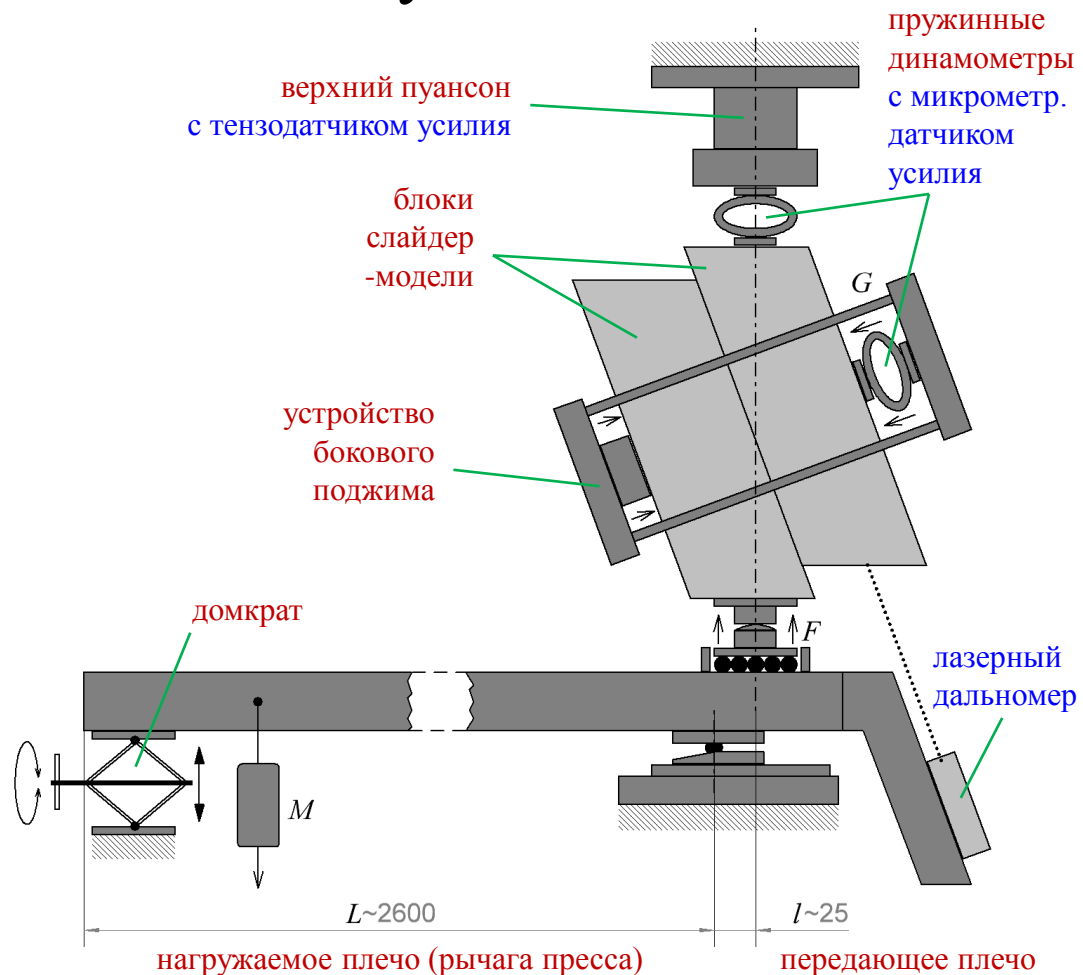
# Схема экспериментальной установки

## Силовая механическая часть:

- рычажный пресс с усилием до 20 тс;
- пружинные динамометры ДОСМ-3-05 жёсткостью около  $5.6 \cdot 10^6$  Н/м;
- устройство бокового поджима блоков слайдер-модели.

## Измерительная часть:

- лазерный дальномер ИЛД-2300-100, частотой регистрации до 50 кГц и разрешением до 1.5 мкм;
- тензодатчик основного усилия, чувствительностью около -48.8 мВ/кН;
- микрометрический датчик основного усилия (более точный, чем тензодатчик);
- система регистрации акустической эмиссии (АЭ) ALine 32D.

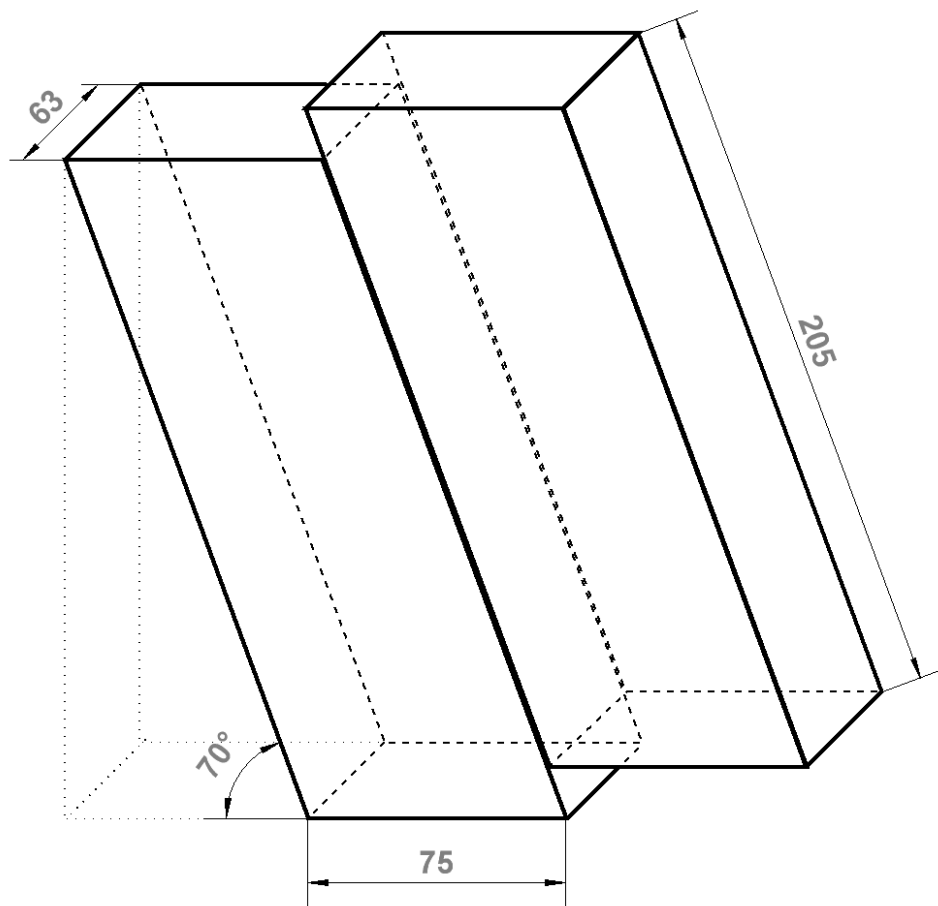


# Схема экспериментальной установки

## Экспериментальный материал:

Два блока горной породы, каждый из которых характеризуется параметрами:

- горная порода - светлый мрамор плотностью около  $2.7 \text{ г/см}^3$ ;
- форма в виде наклонного параллелепипеда с углом наклона около  $70^\circ$ ;
- линейные размеры  $75 \times 205 \times 63 \text{ мм}$ ;
- объем около  $900 \text{ см}^3$ , масса около  $2.35 \text{ кг}$ .



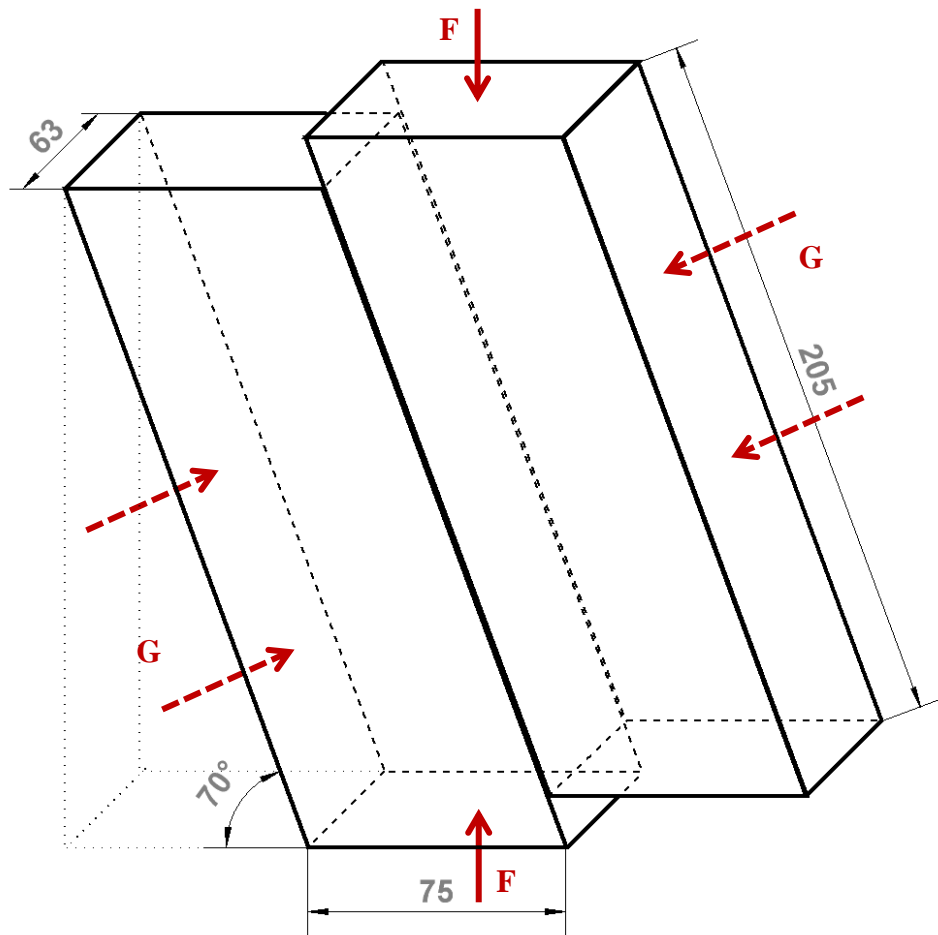
# Схема экспериментальной установки

## Слайдер-модель:

- оба блока установлены в контакте по одной из наклонных граней (модельный разлом) с небольшим первоначальным смещением друг относительно друга (немногим более 10 мм); контактирующие поверхности «притерты» друг к другу в ходе предварительных экспериментов;

- **основное усилие  $F$**  передается с верхнего пуансона прессы на один из блоков, и с нижнего пуансона – на другой (два варианта передачи усилия - «жесткое» и «мягкое», без и с установкой пружинного динамометра);

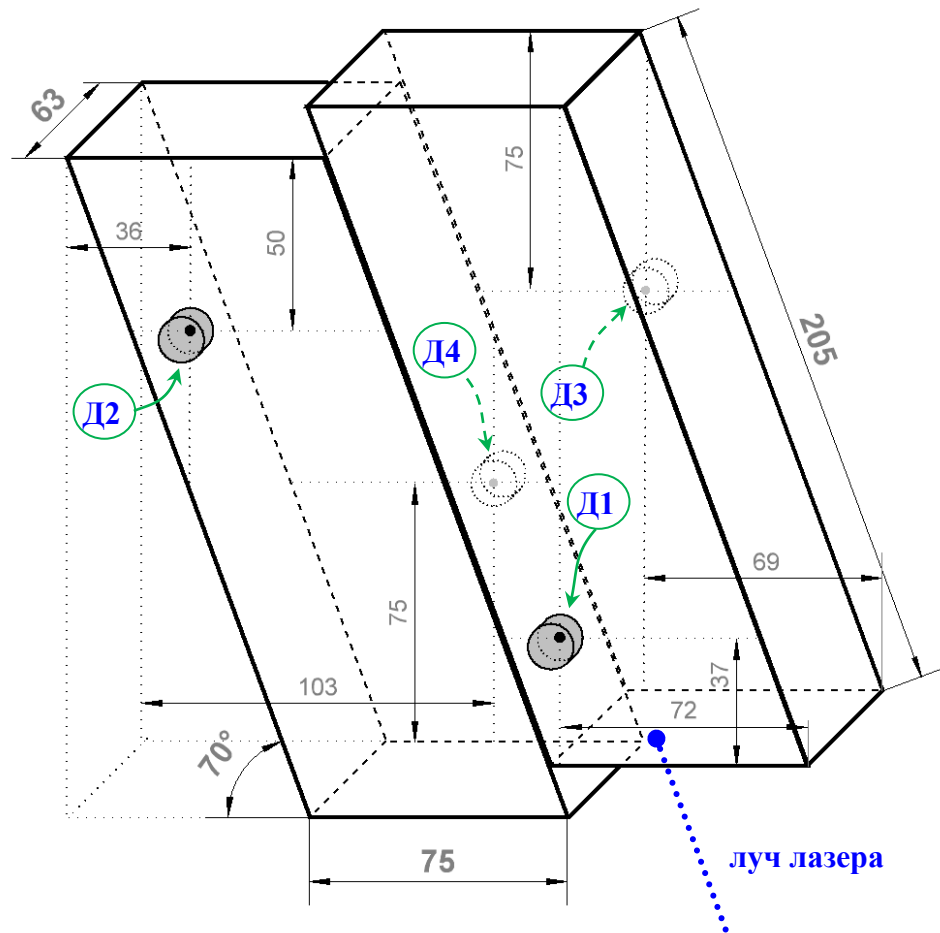
- к боковым поверхностям образцов, противоположным поверхности контакта, приложено **боковое усилие  $G$**  около 47 кН, что дает на контакте нормальное давление около  $42.5 \text{ кгс/м}^2$  (только «мягкий» поджим).



# Схема экспериментальной установки

## Слайдер-модель:

- лазерный датчик установлен так, что **луч лазера** параллелен поверхности контакта блоков;
- на боковых поверхностях блоков, перпендикулярных поверхности контакта и параллельных основному усилию, установлены датчики АЭ Д1-Д4.



# Методика эксперимента

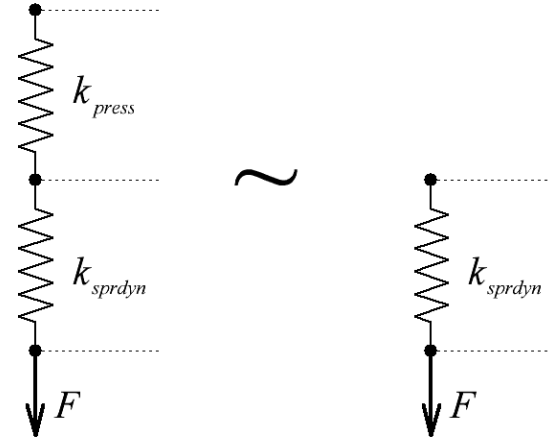
## Жесткость нагружающей системы:

- при «мягком» нагружении возможно пренебречь при расчетах жесткостью прессы, поскольку жесткость пружинного динамометра по крайней мере на порядок меньше жесткости прессы

$$\frac{1}{k_{\text{нс}}} = \frac{1}{k_{\text{press}}} + \frac{1}{k_{\text{sprdyn}}} \approx \frac{1}{k_{\text{sprdyn}}}$$

при  $k_{\text{sprdyn}} \ll k_{\text{press}}$

- при «жестком» нагружении жесткость нагружающей системы равна жесткости прессы.



Жесткость пружинного динамометра  
 $k_{\text{sprdyn}} \approx 5.6 \cdot 10^6$  Н/м (паспортные данные)

Жесткость прессы  
 $k_{\text{press}}$  не менее  $6 \cdot 10^7$  Н/м (эксперим. оценка)



# Методика эксперимента

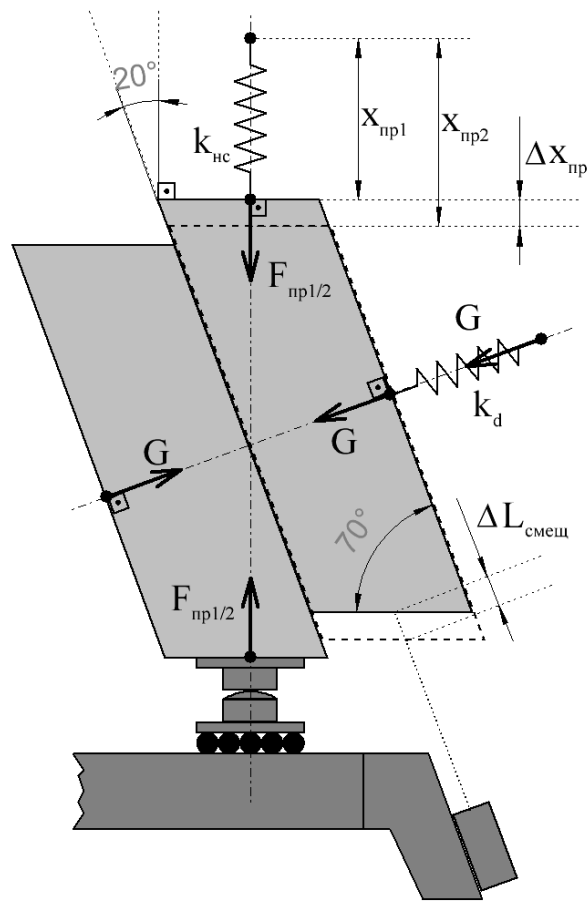
Изменение потенциальной энергии при подвижке:

Зная основное усилие  $F_{\text{пр}}$ , смещение блоков друг относительно друга  $L_{\text{смещ}}$ , можно оценить уменьшение (сброс) потенциальной упругой энергии нагружающей системы при срыве (быстрой подвижке типа стик-слип):

$$-\Delta W_{\text{пот}} = \frac{F_{\text{пр}2} \cdot x_{\text{пр}2}}{2} - \frac{F_{\text{пр}1} \cdot x_{\text{пр}1}}{2}$$

$$\Delta x_{\text{пр}} \approx \Delta L_{\text{смещ}} \cdot \sin 70^\circ$$

что справедливо в предположении об упругом характере разгрузки вне зависимости от стабильности жесткости всей системы.



# Методика эксперимента

## Работа суммы сил при подвижке:

Зная эволюцию суммы сил  $F_{\Sigma}$ , действующих на блок, движущийся в системе координат лазерного датчика, можно оценить их работу

$$A = \int_{\Delta L_{\text{смещ}}} F_{\Sigma}(l) \cdot dl$$

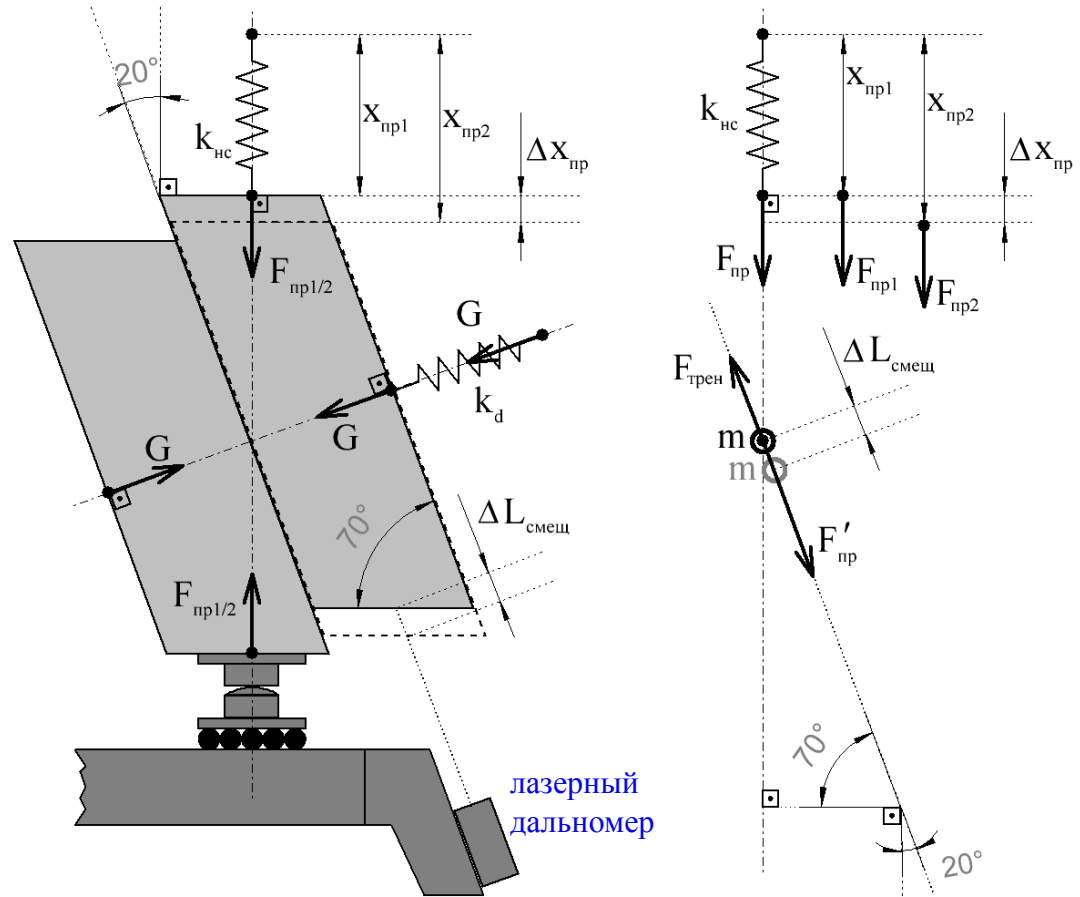
$$A = \int_{\Delta T_{\text{смещ}}} F_{\Sigma}(t) \cdot \frac{dl(t)}{dt} \cdot dt$$

где  $F_{\Sigma} = m \cdot a(t)$

$$(F_{\Sigma} = F'_{\text{пр}} - F_{\text{трэн}})$$

С другой стороны, вся эта работа обусловлена потерей системой потенциальной энергии ( $\Delta W_{\text{кин}}=0$ ):

$$A = \Delta W_{\text{sum}} = \Delta W_{\text{кин}} + \Delta W_{\text{пот}} = \Delta W_{\text{пот}}$$



# Методика эксперимента

## Баланс энергий:

Таким образом, можно записать баланс энергии в системе за время подвижки:

$$A = \int_{\Delta T_{\text{смещ}}} m \cdot a(t) \cdot \frac{dl(t)}{dt} \cdot dt \approx |\Delta W_{\text{пот}}| = \left| \frac{F_{\text{пр}2} \cdot x_{\text{пр}2}}{2} - \frac{F_{\text{пр}1} \cdot x_{\text{пр}1}}{2} \right|$$

Важно, что здесь не фигурируют жесткость системы и сила трения, что позволяет делать оценку независимо от их изменения при подвижке.

Для оценки указанных величин необходимо знать:

$m$  – масса движущегося блока;

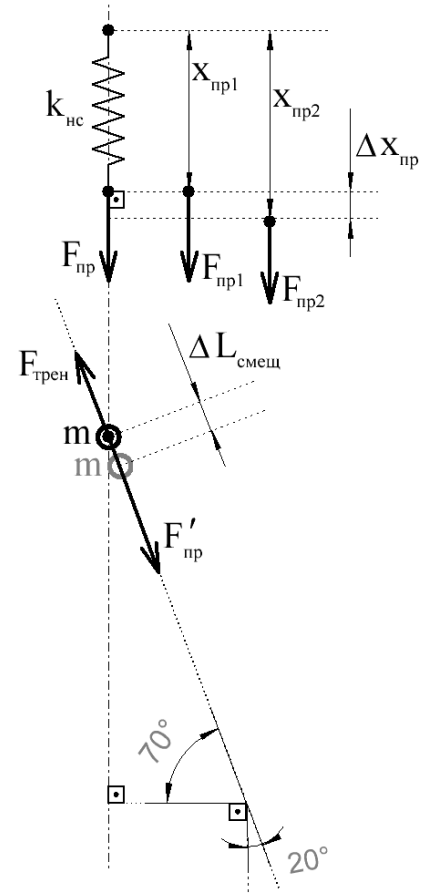
$a(t)$  – эволюция ускорения «движущегося» блока в процессе подвижки;

$\frac{dl(t)}{dt} = v(t)$  – эволюция скорости «движущегося» блока при подвижке;

$F_{\text{пр}1}$  и  $F_{\text{пр}2}$  - основное усилие до и после подвижки;

$x_{\text{пр}1}$  и  $x_{\text{пр}2}$  - сжатие пружины до и после подвижки.

Эволюция ускорения и скорости блока могут быть оценены по данным лазерного датчика расстояния с высокой разрешающей способностью.

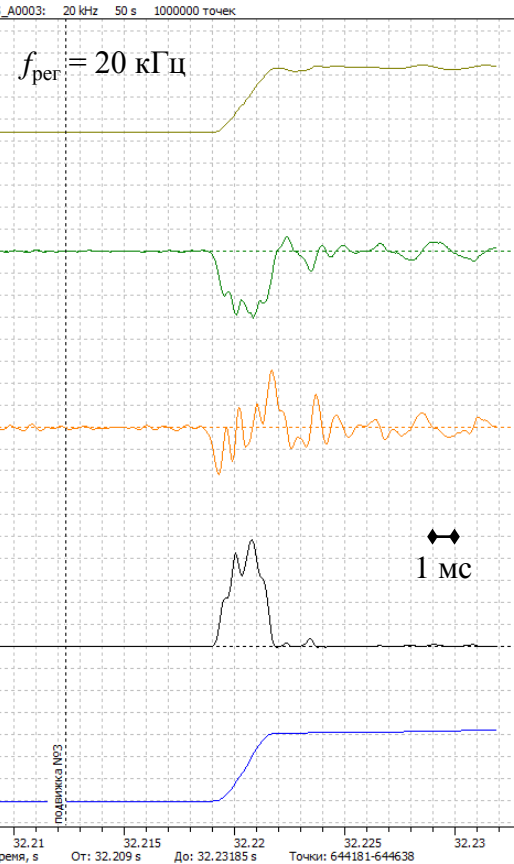


# Результаты экспериментов

Пример данных - эксперимент ТСД612081504 («мягкое» нагружение), подвижка №3

смещение  
(с начала  
эксперимента)

$\Delta L_{\text{смещ}}(t)$ ,  
мм



скорость  
смещения

$V(t)$ ,  
м/с<sup>2</sup>

$a(t)$ ,  
м/с<sup>2</sup>

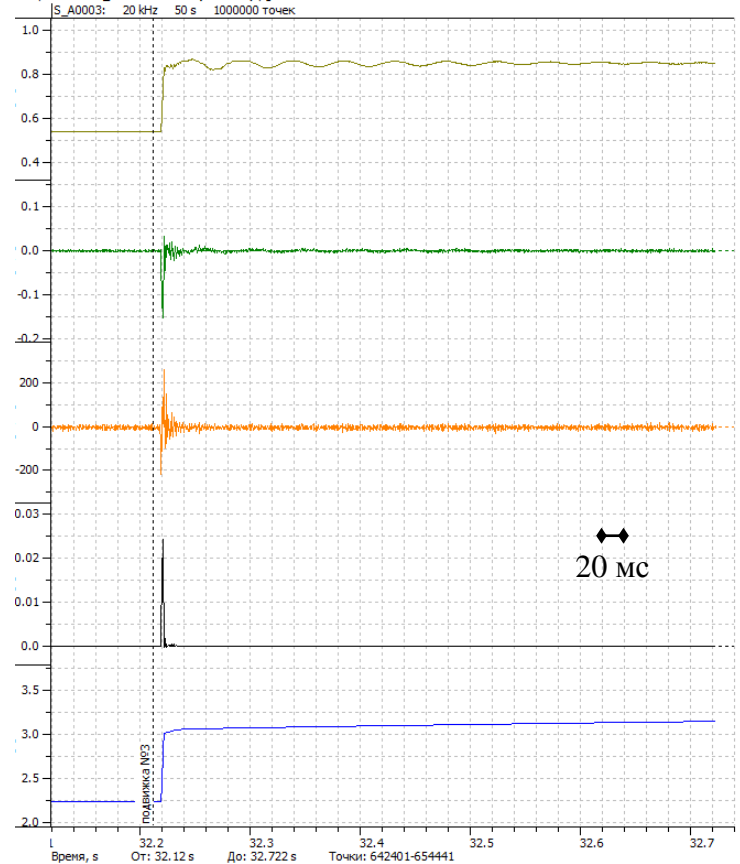
ускорение  
смещения

работа  
суммы  
сил (мгнов.)

$A_{\text{sum}}(t)$ ,  
Дж

$\Delta W_{\text{sum}}(t)$ ,  
мм

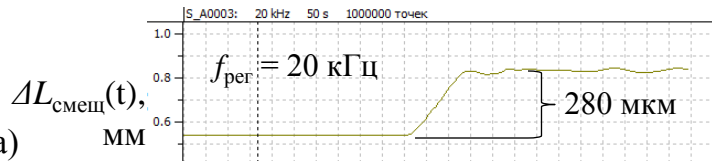
энергия на  
работу  
суммы сил



# Результаты экспериментов

Пример данных - эксперимент ТСД612081504 («мягкое» нагружение), подвижка №3

смещение  
(с начала  
эксперимента)



скорость  
смещения



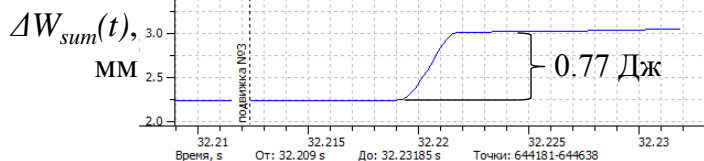
ускорение  
смещения



работа  
суммы  
сил (мгнов.)



энергия на  
работу  
суммы сил

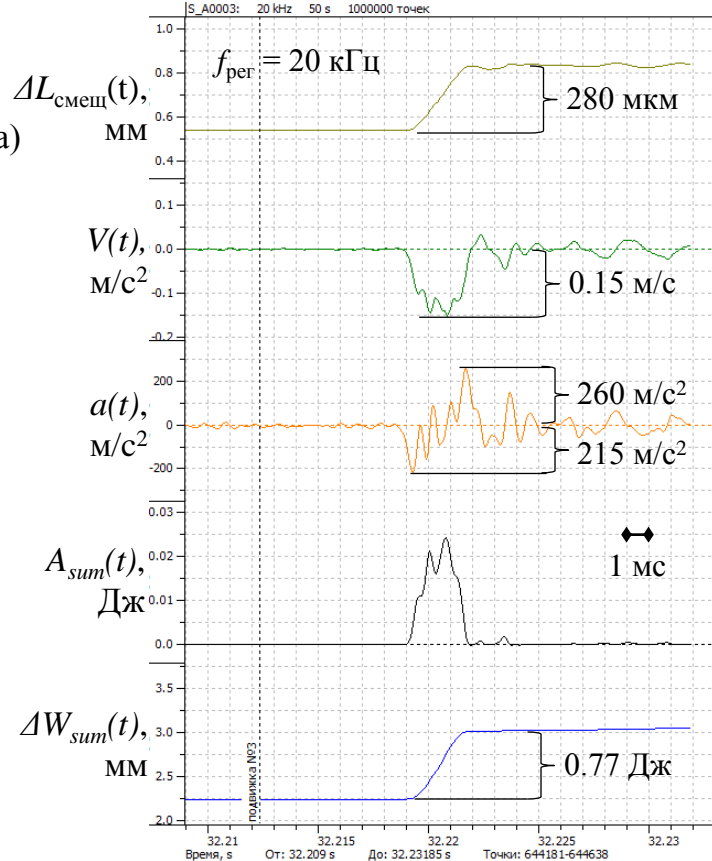


	До срыва	После срыва	Изменение
$\Delta L_{\text{смест}}$ , мкм (лазерный датчик, измерение)	540	820	280
$\Delta W_{\text{sum}}$ , Дж (лазерный датчик, расчет)	2.23	3.01	0.77
$F$ , кН основное усилие (динамометр)	3.430	1.67	1.76
$\Delta W_{\text{пот}}$ , Дж изменение упруг. энергии (расчет)	0.935	0.22	0.715

# Результаты экспериментов

Пример данных - эксперимент ТСД612081504 («мягкое» нагружение), подвижка №3

смещение  
(с начала  
эксперимента)



скорость  
смещения

ускорение  
смещения

работа  
суммы  
сил (мгнов.)

энергия на  
работу  
суммы сил

	До срыва	После срыва	Изменение
$\Delta L_{\text{смест}}$ , мкм (лазерный датчик, измерение)	540	820	280
$\Delta W_{\text{sum}}$ , Дж (лазерный датчик, расчет)	2.23	3.01	0.77
$F$ , кН основное усилие (динамометр)	3.430	1.67	1.76
$\Delta W_{\text{пот}}$ , Дж изменение упруг. энергии (расчет)	0.935	0.22	0.715

# Результаты экспериментов

Эксперимент ТСД612081504 («мягкое» нагружение), все подвижки

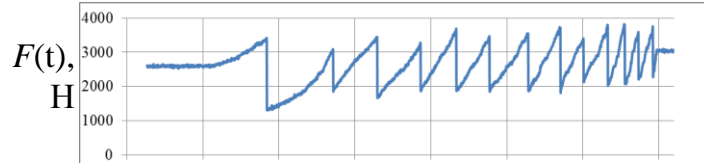
Всего за данный эксперимент наблюдалось 13 срывов (быстрых подвижек), средней величины 260 мкм и длительности 2.6 мс. Весь эксперимент длился около 10 минут. Нагружение производилось со скоростью 50-100 Н/с.

№	Время подвижки	Длительность, мс	Величина смещения, мкм
1	15:05:51	2.7	270
2	15:06:43	2.4	215
3	15:07:18	3	315
4	15:07:52	2.5	170
5	15:08:21	2.4	270
6	15:08:47	2.4	250
7	15:09:17	2.6	290
8	15:09:43	2.7	300
9	15:10:01	2.6	240
10	15:10:20	2.6	270
11	15:10:34	3	290
12	15:10:44	2.7	230
13	15:10:56	2.7	260
ср.		2.63	259.2

# Результаты экспериментов

Эксперимент ТСД612081504 («мягкое» нагружение), все подвижки

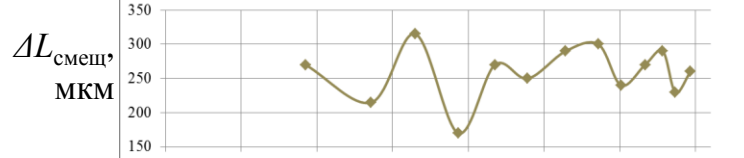
основное  
усилие



$F(t)$ ,  
Н

основное  
усилие

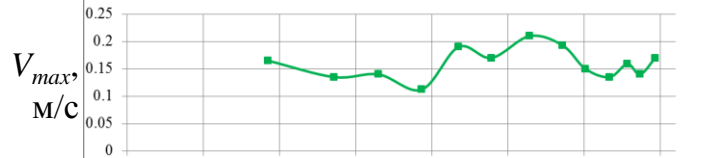
величина  
подвижки



$\Delta T_{\text{смест}}$ ,  
мс

длитель-  
ность  
подвижки

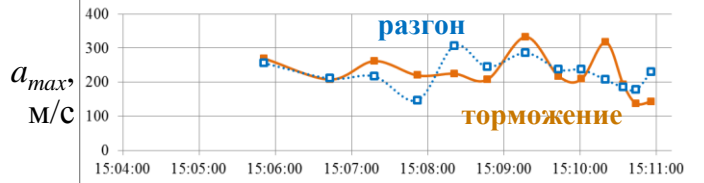
макс.  
скорость при  
подвижке



$\Delta W_{\text{sum}}$ ,  
Дж

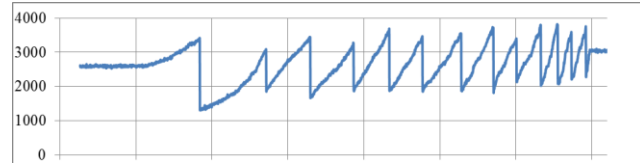
энергия на  
работу  
суммы сил

макс.  
ускорение  
при  
подвижке



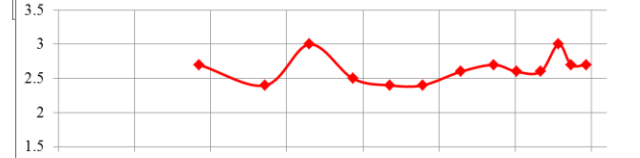
$F_{\text{max}}$   
 $F_{\text{min}}$   
 $\Delta F$ ,  
м/с

основное  
усилие до и  
после  
сброса,  
величина  
сброса



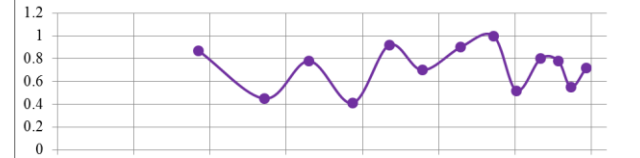
$F(t)$ ,  
Н

основное  
усилие



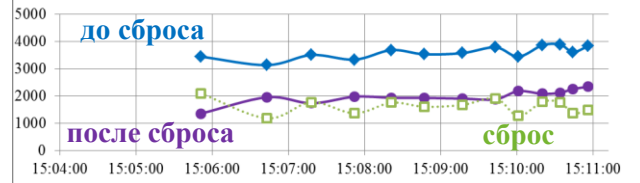
$\Delta T_{\text{смест}}$ ,  
мс

длитель-  
ность  
подвижки



$\Delta W_{\text{sum}}$ ,  
Дж

энергия на  
работу  
суммы сил



$F_{\text{max}}$   
 $F_{\text{min}}$   
 $\Delta F$ ,  
м/с

основное  
усилие до и  
после  
сброса,  
величина  
сброса

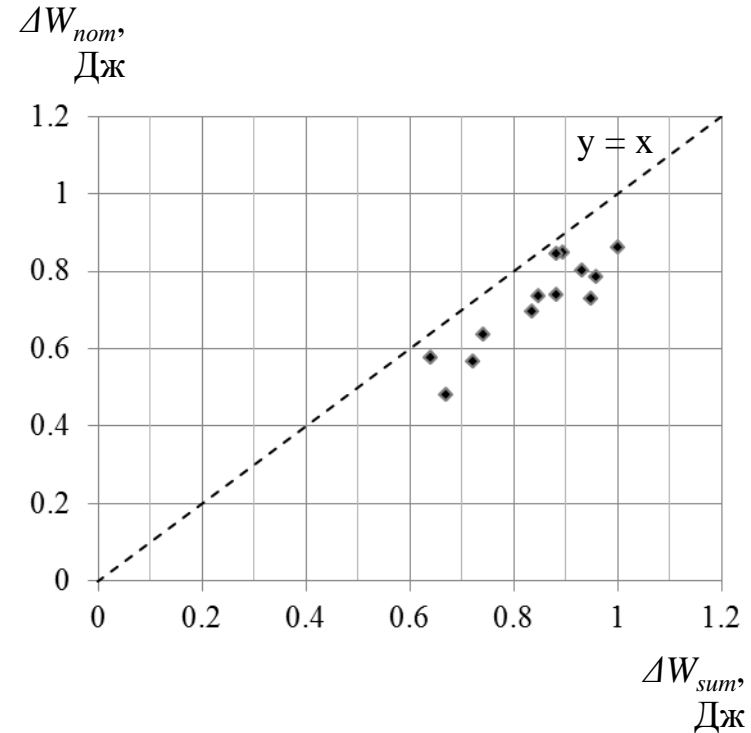


# Результаты экспериментов

Эксперимент ТСД612081504 («мягкое» нагружение), все подвижки

По всем подвижкам была произведена качественная оценка корреляции между сброшенной потенциальной энергией  $\Delta W_{\text{пот}}$  и энергией  $\Delta W_{\text{sum}}$ , затраченной на работу суммы сил. В целом они показывают близость друг к другу, но значения лежат несколько ниже кривой  $y = x$ , причиной чего может быть:

- заниженная оценка  $\Delta W_{\text{пот}}$  из-за низкой частоты регистрации основного усилия (его эволюция во процессе подвижки неизвестна, из-за чего система к моменту оценки основного усилия после сброса успевает накопить некоторую упругую энергию);
- пренебрежение упругой деформацией остальных частей системы кроме пружинного динамометра;
- неупругий характер деформации системы.



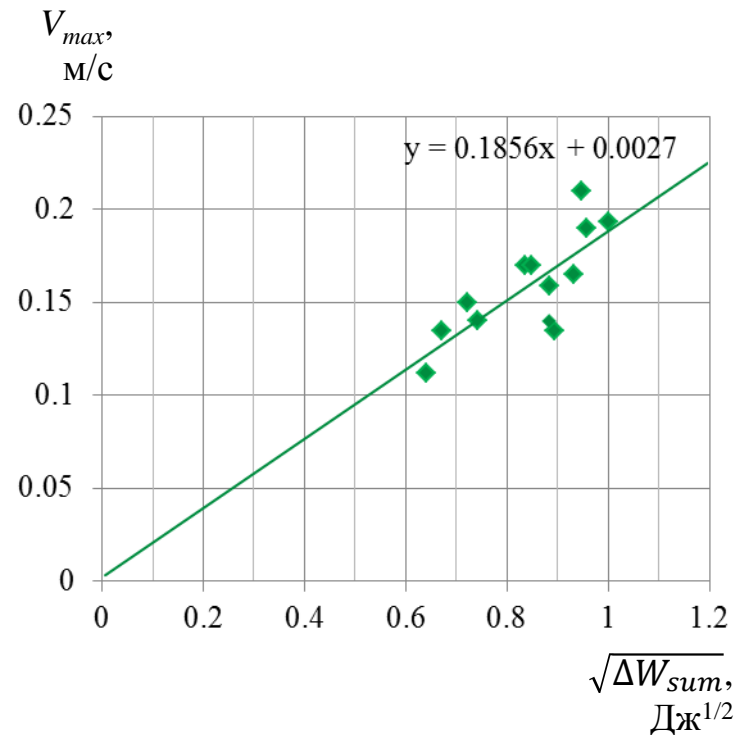
# Результаты экспериментов

Эксперимент ТСД612081504 («мягкое» нагружение), все подвижки

Отдельно интересно оценить кинетическую энергию «движущегося» блока в момент достижения максимальной скорости:

$$W_{\text{кин\_max}} = \frac{m \cdot V_{\text{max}}^2}{2}$$

Поскольку она пропорциональна квадрату максимальной скорости с точностью до множителя, то построим зависимость  $V_{\text{max}}$  от корня из  $\Delta W_{\text{sum}}$  - энергии, затраченной на работу суммы сил. Просматривается линейная зависимость  $V_{\text{max}} \sim \sqrt{\Delta W_{\text{sum}}}$ . Это говорит о том, что к моменту приобретения максимальной скорости, кинетическая энергия составляет примерно постоянную для всех подвижек долю от всей освобождающейся упругой энергии. Эта доля может оценена в ~4%.



# Результаты экспериментов

## Эксперимент ТСД612081504 («мягкое» нагружение)

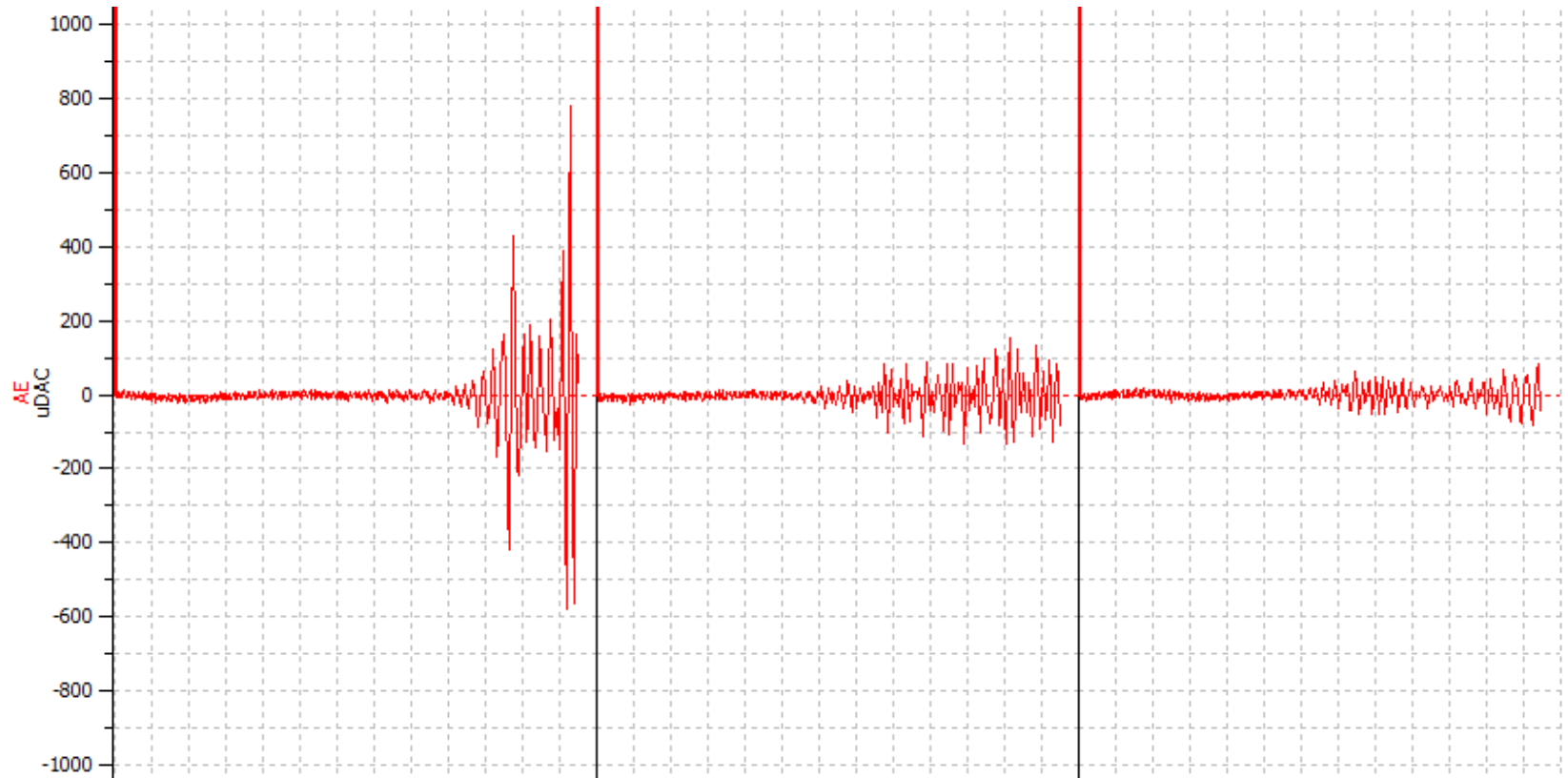
Средняя длительность подвижки ~ 2.6 мс  
Средняя величина подвижки ~ 260 мкм  
Максимальная скорость подвижки ~ 0.16 м/с  
Максимальная ускорение ~ 230 м/с<sup>2</sup>  
Средняя энергия подвижки ~ 0.7 Дж  
Сброс усилия при подвижке ~ 1.5 кН  
Основное усилие до срыва ~ 3.5 кН  
Основное усилие после срыва ~ 1.9 кН  
Есть равномерное скольжение блока до подвижки, но слабое; срывов без значимой подвижки практически нет. После срывов колебательность низкочастотная и небольшая.

## Эксперимент ТСД6111011502 («жесткое» нагружение)

Средняя длительность подвижки ~ 2.4 мс  
Средняя величина подвижки ~ 140 мкм  
Максимальная скорость подвижки ~ 0.1 м/с  
Максимальная ускорение ~ 155 м/с<sup>2</sup>  
Средняя энергия подвижки ~ 0.25 Дж  
Сброс усилия при подвижке ~ 1.5 кН  
Заметно неравномерное скольжение блока до подвижки, много срывов без значимой подвижки. После срывов с подвижкой заметна существенная колебательность с более высокочастотным характером по сравнению с «мягким» нагружением.

# Результаты экспериментов

Регистрация АЭ – проблема недостаточности длины записи



# Выводы

- При измерении смещения с высоким пространственным и временным разрешением появляется возможность определения кинематических параметров подвижек типа стик-слип.
- Зная эволюцию величины смещения в процессе подвижки  $L_{\text{смещ}}(t)$  можно не только определить значения достигаемых скоростей и ускорений, но и оценить интегральные величины, в частности, работу суммы сил по смещению блоков слайдер-модели.
- Зная работу суммы сил, а также сброшенную потенциальную упругую энергию системы (по данным об усилении), можно оценить также баланс энергий в системе.
- Проведены пробные эксперименты с «мягким» постоянным боковым поджатием (усилие 47 кН, жесткость  $5.6 \cdot 10^6$  Н/м) и «мягким»/«жестким» основным нагружением (до 4 кН, жесткостью при мягком нагружении около  $5.6 \cdot 10^6$  Н/м).
- При «мягком» нагружении энергия подвижки составляет около 0.7 Дж, при «жестком» – около 0.25 Дж (при прочих равных условиях, включая сброс усилия при срыве). Остальные параметры подвижки (величина, длительность и др.) при «жестком» нагружении также меньше.

# Выводы

- Был успешно опробован лазерный дальномер MicroEpsilon optoNCDT ILD-2300-100, который показал большую эффективность при оценки расстояний.
- Определено, что тензометрические измерения не дают большой точности при оценке усилий, а использование микрометрического принципа измерений на пружинном динамометре позволяет оценить усилие с большей точностью. Для этой цели опробованы LVDT-датчики смещения, разработана аппаратура и программное обеспечения для захвата сигналов для них.
- Определено, что в рамках разнородных систем сбора данных невозможно добиться высокой точности их синхронизации из-за разных используемых интерфейсов и отсутствия возможности аналоговой синхронизации; необходима единая система регистрации с низкоуровневой синхронизацией.

*Авторы выражают глубокую благодарность сотрудникам ИДГ РАН Кочаряну Г.Г. и Остапчуку А.А. за возможность опробования лазерного дальномера.*

Спасибо за внимание!





# Формулы

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_{press}} + \frac{1}{k_{sprdyn}} \approx \frac{1}{k_{sprdyn}}$$

при  $k_{sprdyn} \ll k_{press}$

$$-\Delta W_{пот} = \frac{k_{нс} \cdot x_{пр2}^2}{2} - \frac{k_{нс} \cdot x_{пр1}^2}{2}$$

$$-\Delta W_{пот} = \frac{F_{пр2} \cdot x_{пр2}}{2} - \frac{F_{пр1} \cdot x_{пр1}}{2}$$

$$x_{пр} = L_{смещ} \cdot \sin 70^\circ$$

$$F'_{пр} = F_{пр} \cdot \sin 70^\circ$$

$$W_{кин\_max} = \frac{m \cdot V_{max}^2}{2}$$

$$V_{max} \sim \sqrt{\Delta W_{sum}}$$

$$A = \int_{\Delta L_{смещ}} F_{\Sigma}(l) \cdot dl$$

$$A = \int_{\Delta T_{смещ}} F_{\Sigma}(t) \cdot \frac{dl(t)}{dt} \cdot dt$$

где  $F_{\Sigma} = m \cdot a(t)$

$$(F_{\Sigma} = F'_{пр} - F_{трэн})$$

$$A = \Delta W_{sum} = \Delta W_{кин} + \Delta W_{пот} = \Delta W_{пот}$$