



**С.В. Доронин**

*Федеральный исследовательский центр информационных  
и вычислительных технологий,  
г. Красноярск, Российская Федерация*

**Р.В. Зеленов**

*ООО Научно-исследовательский центр «СибЭРА»,  
г. Красноярск, Российская Федерация*

**Е.М. Рейзмунт**

*Федеральный исследовательский центр информационных  
и вычислительных технологий,  
г. Красноярск, Российская Федерация*

**А.П. Черняев**

*ООО Научно-исследовательский центр «СибЭРА»,  
г. Красноярск, Российская Федерация*

## **Модель ударного импульса при трамбовании угольной загрузки для производства кокса**

**Аннотация.** В настоящее время существенно уменьшаются запасы коксующихся углей, необходимых для производства высококачественного кокса. Одной из перспективных технологий подготовки сырья для производства кокса является трамбование угольной загрузки: за счет увеличения ее плотности снижаются требования к качеству исходных углей и появляется возможность широкого применения, наряду с коксующимися, и угля худшего качества. Определение характеристик технологии и оборудования трамбования осуществляется преимущественно эмпирическим путем, что не гарантирует получения научно обоснованных эффективных технических решений при их разработке. Одной из ключевых характеристик процесса трамбования угольной загрузки является энергия удара и соответствующие ей параметры ударного импульса — они определяют как плотность угольной загрузки, так и динамические воздействия на силовые конструкции оборудования. Последнее, в свою очередь, определяет работоспособность оборудования, выражаемое в терминах прочности, устойчивости, долговечности. Экспериментальный анализ и построение математической модели ударного импульса при трамбовании угольной загрузки направлены на информационное обеспечение процесса проектирования и расчета, значительно снижают уровень неопределенности при разработке техники и технологии трамбования. Показано, что ударный импульс хорошо аппроксимируется полуволной синусоиды. Для молотка с определенными геометрическими и массовыми характеристиками, и соответствующей им энергии удара определены интервалы изменения продолжительности и пикового значения усилия ударного импульса, а также взаимосвязь между этими характеристиками. Они являются информационной базой для экспертного оценивания характеристик ударного импульса при изменении энергии трамбования.

**Ключевые слова.** Математическая модель ударного импульса, трамбование угольной шихты, продолжительность импульса, пиковое ускорение, натурный эксперимент, датчик виброускорений.

**Информация о статье.** Дата поступления: 20 июля 2023 г.; дата принятия к публикации: 20 ноября 2023 г.; дата онлайн-размещения: 12 декабря 2023 г.

Original article

**S.V. Doronin**

*Federal Research Center for Information  
and Computational Technologies,  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

**R.V. Zelenov**

*SibERA Scientific Research Center LLC,  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

**E.M. Reizmunt**

*Federal Research Center for Information  
and Computational Technologies,  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

**A.P. Chernyaev**

*SibERA Scientific Research Center LLC,  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

## **Shock Impulse Model when Compacting a Coal Load for Coke Production**

**Abstract.** Currently, the reserves of coking coals necessary for the production of high-quality coke are significantly reduced. One of the promising technologies for the preparation of raw materials for the production of coke is the ramming of coal charge: by increasing its density, the requirements for the quality of the initial coals are reduced and it becomes possible to widely use, along with coking, and coal of the worst quality. Determination of the characteristics of the ramming technology and equipment is carried out mainly empirically, which does not guarantee the receipt of scientifically based effective technical solutions during their development. One of the key characteristics of the coal charge ramming process is the impact energy and the shock pulse parameters corresponding to it — they determine both the density of the coal charge and the dynamic effects on the load-bearing structures of the equipment. The latter, in turn, determines the operability of the equipment, expressed in terms of strength, stability and durability. Experimental analysis and development of a mathematical model of the shock pulse during ramming of coal charge are aimed at providing information for the design and calculation process, significantly reducing the level of uncertainty in the development of ramming equipment and technology. It is shown that the shock pulse is well approximated by a sine half-wave. For a hammer with certain geometric and mass characteristics, and the corresponding impact energy, the intervals of change in the duration and peak value of the impact pulse force, as well as the relationship between these characteristics, are determined. They are an information base for expert evaluation of the characteristics of the shock pulse when the coal charge ramming energy changes.

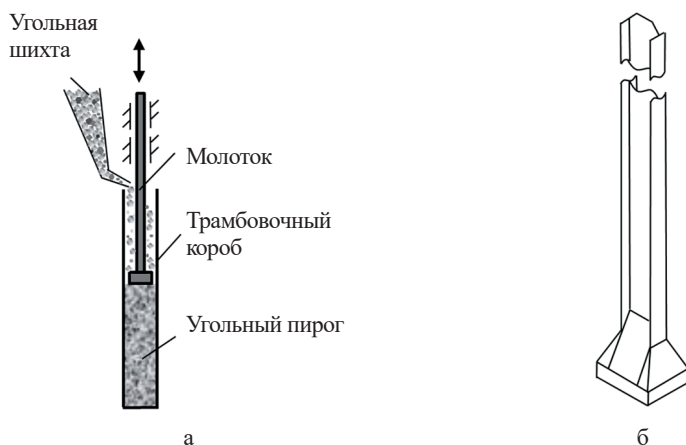
**Keywords.** Mathematical model of shock impulse, coal charge compaction, impulse duration, peak acceleration, full-scale experiment, vibration acceleration sensor.

**Article info.** Received 20 July, 2023; Accepted 20 November, 2023; Available online 12 December, 2023.

## Введение

Качество кокса в значительной степени определяется составом и подготовкой угольной загрузки коксовых печей. Известна возможность сохранения качества кокса при ухудшении состава угольной загрузки путем совершенствования технологии ее подготовки. Компактирование угольной загрузки (одним из способов которого является трамбование) позволяет включать в состав шихты угли более низкого качества при одновременном увеличении объемов и снижении себестоимости производства кокса [1].

Трамбование угольной загрузки осуществляется в стальных емкостях (камерах), называемых трамбовочными ящиками [1], камерами [2, 3] или коробами (далее будем использовать наименование «короб»). В короб сверху постоянно подается шихта, трамбуемая молотками, периодически свободно падающими с регулируемой частотой под собственным весом (рис. 1). В результате трамбования получается так называемый угольный пирог, имеющий форму, близкую к параллелепипеду, и характеризующийся показателями плотности и прочности.



**Рис. 1. Принципиальная схема технологии трамбования угольной загрузки (а) и эскиз молотка (б)**

Таким образом, анализ работоспособности трамбовочного короба следует выполнять с двух позиций, рассматривая его как силовую (несущую) металлоконструкцию (критерии работоспособности — конструкционная целостность, отсутствие неупругих деформаций, устойчивость, отсутствие резонансных явлений), и как устройство для получения угольного пирога, пригодного для загрузки в коксовую печь (критерий работоспособности — получение пирога с требуемыми характеристиками прочности и плотности).

Несмотря на то, что теоретические основы процесса трамбования изучены и описаны [3], нет полной ясности во взаимосвязи между характеристиками трамбовочного оборудования и требуемыми значениями плотности и прочности пирога, теория и методология проектирования трамбовочного оборудования не разработаны в должной степени. Это приводит к тому, что в некоторых случаях трамбовочное оборудование, являющееся объектом индивидуального проектирования и изготовления, не обладает достаточными прочностными и жесткостными характеристиками и не позволяет обеспечить изготовление пирога требуемых плотности и прочности, что затрудняет дальнейшую его загрузку в коксовую печь.

Механическое поведение оборудования в процессе трамбования в значительной степени определяется условиями динамического взаимодействия падающих молотков и массива угольной шихты в коробе. Разработка математической модели такого взаимодействия обуславливает возможность проведения проектных расчетов оборудования в динамической постановке для анализа и обеспечения его работоспособности. В противном случае выполняются расчеты в весьма упрощенной квазистатической постановке, что не может гарантировать соответствия спроектированного оборудования требованиям прочности, ресурса, успешной реализации технологии получения прочного и плотного угольного пирога. Отмечается, что недостаточность знаний о процессе трамбования не позволяет получить достоверную информацию о давлении на стенки короба, что приводит к ошибкам при проектировании и снижению качества конструкции [4]. В связи с этим актуальны обоснования модели динамического взаимодействия падающего молотка и массива шихты в коробе, естественной формой которой является ударный импульс, характеризующийся продолжительностью и пиковым значением нагрузки.

## **Оборудование и технология трамбования шихты как система.**

### **Условия формирования ударного импульса**

Типичная конфигурация оборудования трамбования включает в себя собственно короб в составе загрузочной машины и стационарное загрузочное устройство, обеспечивающее подачу шихты и согласованную работу молотков. Цикл работы оборудования состоит из следующих операций: подача загрузочной машины с коробом под стационарное загрузочное устройство; заполнение короба угольной шихтой при непрерывном трамбовании падающими молотками с образованием угольного пирога; перемещение загрузочной машины с трамбованным пирогом в коробе к коксовой батарее; выталкивание пирога в камеру коксовой печи. Короб представляет собой пространственную металлоконструкцию из листового проката и балок различных профилей. Применяющие-

ся в настоящее время на разных предприятиях конструкции трамбовочных коробов имеют высоту до 7 м, длину до 16 м, ширину рабочего пространства порядка 400–450 мм. Внутреннее (рабочее) пространство короба образовано двумя боковыми и двумя торцевыми стенками. Для реализации операции выталкивания пирога в камеру коксовой печи одна боковая стенка выполняется подвижной (отодвигающейся), роль одной из торцевых стенок выполняет дверь (откатывающаяся непосредственно перед выгрузкой пирога в печь), второй торцевой стенкой при трамбовании и транспортировании служит каретка, выталкивающая пирог в камеру печи через открытую дверь.

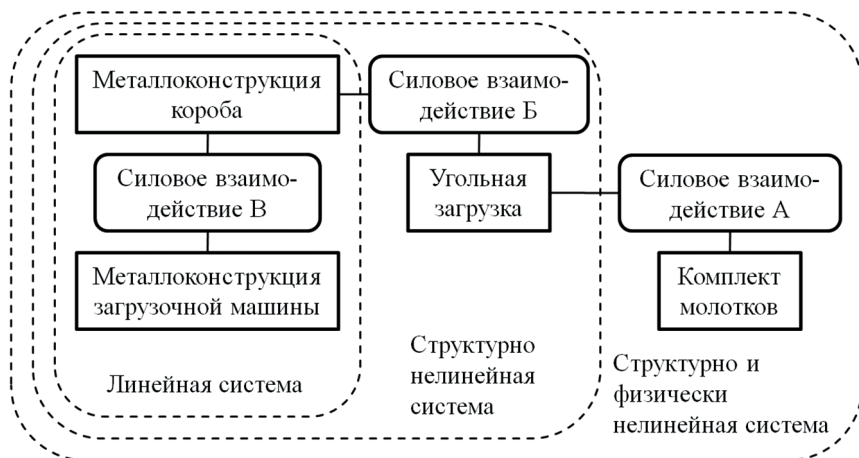
В целях понимания условий формирования ударного импульса рассмотрим систему трамбования «падающие молотки — угольная загрузка — трамбовочный короб» (рис. 2), обладающую свойством эмерджентности и состоящую из трех основных физических подсистем:

I — жестко соединенные металлоконструкции короба и загрузочной машины;

II — угольная загрузка, в верхней части представленная подаваемой шихтой в сыпучем состоянии, в нижней части — трамбованным пирогом;

III — комплект молотков, согласованно падающих по заданному алгоритму.

Каждая из подсистем имеет легко определяемые границы и обладает собственным комплексом физических и технических свойств. Выделение и анализ условий взаимодействия этих подсистем способствует более глубокому пониманию закономерностей проявления интегральных свойств системы, в рассматриваемом контексте выражающихся в характеристиках ударного импульса.



**Рис. 2. Структура системы трамбования угольной загрузки**

Металлоконструкции короба и загрузочной машины, жестко связанные неразъемными и разъемными соединениями (силовое взаимодействие В), в силу проектных запасов предполагаются деформирующимися упруго с небольшими амплитудами. Это позволяет рассматривать их как линейную систему (внутренние силовые факторы линейно зависят от внешнего нагружения). При этом отметим, что жесткость металлоконструкций загрузочной машины, являющихся упругим основанием для трамбовочного короба, вносит немаловажный вклад в динамическую жесткость линейной системы, непосредственно влияющую на условия формирования ударного импульса в процессе трамбования.

Силовое взаимодействие Б между металлоконструкцией короба и массивом угольной загрузки реализуется контактом между ними и возможностью проскальзывания загрузки по стенке короба. Интенсивность силового потока, передаваемого через площадь контакта, зависит от распределения этой площади по поверхности стенки и силы трения в контакте. В процессе трамбования условия контактного взаимодействия непрерывно меняются (структурная нелинейность) в связи с увеличением объема и плотности угольной загрузки.

При падении молотков на верхнюю поверхность угольной загрузки силовое взаимодействие А) в коробе идет непрерывное уплотнение сыпучей среды, характеризующееся нелинейной зависимостью усредненных физических характеристик (преимущественно плотности и прочности) пирога от накопленной энергии трамбования, асимптотически приближающихся к некоторым предельным (для конкретных условий опыта) значениям [5]. Это объясняется тем, что с увеличением числа наносимых ударов приращение глубины внедрения после текущего удара монотонно уменьшается, асимптотически стремясь к нулю [6].

Ударный импульс формируется при непосредственном взаимодействии молотка с верхней поверхностью угольной загрузки. Несмотря на то, что в процессе уплотнения сыпучая среда в определенных пределах приобретает свойства твердого тела [7], отметим один из экспериментальных фактов: при одиночном падении молотка на угольную загрузку ее поверхность прогибается на 28 мм [4]. Другими словами, уплотненный, обладающий свойствами упругости, слой угольной загрузки находится ниже зоны непосредственного формирования ударного импульса, а удар молотка о поверхность угольной загрузки может быть принят абсолютно неупругим [7]. При этом распределение степени уплотнения пирога по высоте зависит от времени трамбования, объема и физико-механических свойств засыпаемой шихты и подвержено влиянию упомянутых нелинейностей. Немаловажен факт конечной жесткости металлоконструкций короба и загрузочной маши-

ны, величина которой определяет характер затухающих колебаний короба с угольной загрузкой после каждого удара молотка [5]. Дополнительно отметив случайный характер формы неровностей на поверхности угольной загрузки, приходим к выводу о весьма сложных и нестабильных условиях формирования ударного импульса, который целесообразно описывать с использованием интервального подхода для конкретной конфигурации трамбовочного оборудования.

Таким образом, на формирование ударного импульса в процессе трамбования оказывает влияние комплекс силовых системных взаимодействий в структурно сложной нелинейной механической системе, что крайне ограничивает возможность применения упрощающих допущений в целях построения математических моделей ударной системы.

### **Возможности аналитического определения и постановка задачи экспериментальной оценки ударного импульса в процессе трамбования**

В некоторых случаях характеристики ударного импульса (продолжительность, форма, пиковое значение усилия) могут быть определены аналитически. В наиболее общем виде ударный импульс описывается на основе модели Герца контактного взаимодействия при сжатии двух изотропных упругих тел с идеально гладкими поверхностями [8]. Модель не учитывает колебания, вызванные соударением, предполагает малость площадки контакта и применима для ограниченного количества геометрических форм соударяющихся тел (преимущественно рассматриваются соударение двух полусфер или полусферы и плоской плиты). Указанные ограничения существенно сужают возможности практического применения модели для решения инженерных задач, характеризующихся сложными структурой ударных систем и свойствами их элементов. Отмечается [9], что «наиболее сложные задачи возникают перед инженером-машиностроителем, который имеет дело с явлениями, развивающимися при соударениях узлов или деталей машин; здесь заранее не известны ни возникающие при этом силы, ни вызываемые ими кинематические эффекты».

Развитие теоретических моделей ударных взаимодействий идет как по пути усложнения учитываемых физических явлений при ударе [10–13], так и в направлении расширения допустимых к рассмотрению геометрий и конструктивных форм соударяющихся тел [14–17]. В этом направлении наибольшее количество результатов получено для ударных систем стержневого типа (продольный удар двух стержней или стержня о препятствие). При этом отсутствуют модели ударов для условий, хотя бы частично соответствующих условиям удара молотка об угольную загрузку, и



позволяющие учесть неупругий характер взаимодействия молотка с верхним слоем загрузки в сыпучем состоянии и уплотнения этого слоя, случайный характер формы поверхности верхнего слоя и площади его контакта с молотком.

Для изучения реальных характеристик ударного импульса при трамбовании угольной загрузки необходимы экспериментальные измерения в натурных условиях коксохимического производства. Учитывая особенности конструкции оборудования и технологии трамбования угольной загрузки, сформулированы следующие требования к организации экспериментальных измерений.

1. Измерения должны быть проведены в широком диапазоне интенсивности подачи шихты в короб — от полного отсутствия подачи до максимальной интенсивности, определяемой характеристиками оборудования. Это позволяет учесть весь возможный диапазон высоты слоя шихты (сыпучей среды) в составе угольной загрузки — от отсутствия сыпучего слоя и соударения молотка с утрамбованным пирогом без проникновения в последний, до максимальной высоты слоя, преодоление сопротивления которого существенно меняет количество энергии, расходуемой на ударное взаимодействие непосредственно с угольным пирогом.

2. С учетом значительных линейных размеров молотка измерения должны быть выполнены для верхней и нижней конструктивных зон молотка, соответственно максимально удаленных и приближенных к зоне непосредственного ударного взаимодействия молотка и угольной загрузки. Это косвенно позволяет качественно оценить возможности распространения результатов измерений на зону непосредственного ударного взаимодействия.

### **Организация проведения и результаты натурного эксперимента**

Экспериментальные измерения ударных импульсов проведены на коробе с внутренними размерами емкости  $15,9 \times 6,7 \times 0,415$  м. Угольная загрузка трамбуется набором из 28 молотков массой  $m = 589$  кг каждый, падающих с высоты 0,72 м. Молоток представляет собой штангу, выполненную из двутавра с габаритами сечения  $240 \times 120$  мм, в нижней расширяющейся части которого смонтирована плита с опорной (трамбуемой) поверхностью размерами  $330 \times 410$  мм (рис. 1, б). Общая высота молотка — 12,55 м.

В целях оценки ударного импульса выполнялась регистрация временного ряда виброускорений с использованием виброколлектора STD-510 с выносным датчиком. Датчик устанавливался в двух точках: в верхней части молотка (рис. 3, а) и в нижней его части на двутавре в непосредственной близости от расширяющейся нижней части с помощью короткого стального уголка-датчико-держателя (рис. 3, б).





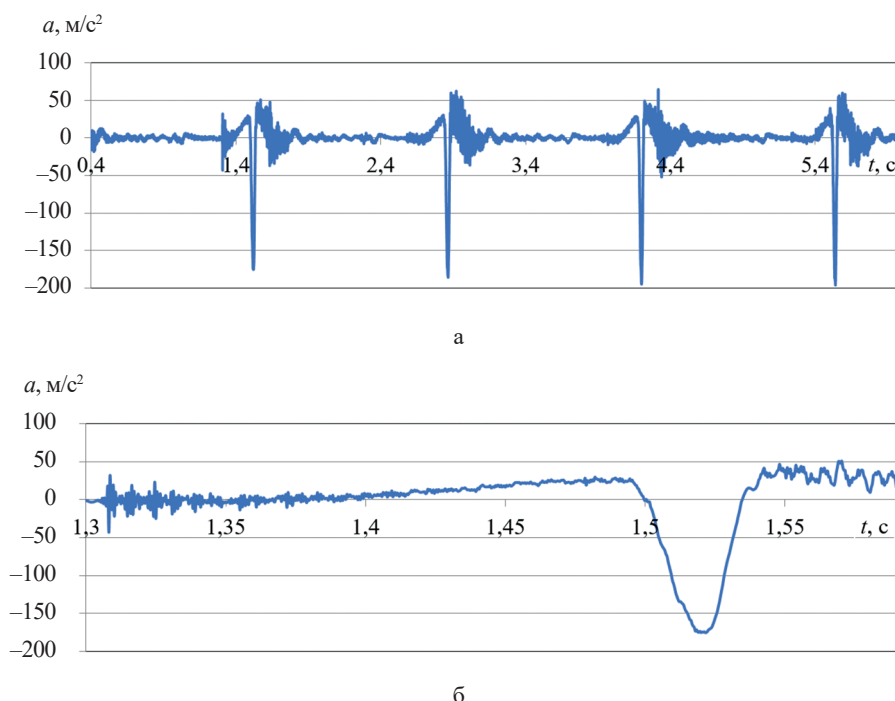
**Рис. 3. Установка выносного датчика виброколлектора:**  
**а — в верхней части молотка; б — в нижней части молотка**  
**(Д — датчик, У — уголок)**

Измерения осуществлялись при высоте пирога 5,5 м, что обусловлено длиной кабеля подключения датчика к виброколлектору и технической возможностью размещения оператора с виброколлектором. После достижения высотой пирога значения 5,5 м процесс трамбования останавливался и выполнялось подключение датчика. Затем возобновлялось трамбование — сначала без, а затем — с подачей шихты. Измерения выполнялись до последней стадии трамбования включительно, в ходе которой подача шихты заканчивалась и выполнялось дотрамбовывание пирога до его окончательного состояния. Это позволило оценить параметры ударного импульса для характерных стадий технологического процесса трамбования: с подачей и без подачи шихты при разной степени утрямбованности пирога.

Исходя из особенностей измерительно-регистрирующей аппаратуры измерения выполнялись кратковременными сессиями длительностью примерно 6 с. Всего было реализовано 25 сессий замеров виброускорений с количеством ударов от 1 до 5 в каждой сессии: для верхней части молотка — 12 сессий совокупным объемом 43 удара, для нижней части — 13 сессий с объемом 50 ударов.

Характерные записи осциллограмм в виде зависимости виброускорений  $a$  от времени  $t$  приведены на рис. 4. Следует отметить весьма сложную структуру временного ряда виброускорений. Это обусловлено наличием и сложным взаимодействием целого ряда физико-технических процессов: возникновением свободных колебаний молотка после соударения с угольной загрузкой, эффектами распространения и отражения упругой волны деформации (ударной волны) в конструкции молотка, случайным процессом дополнительного ударного взаимодействия молотка и падающей на него сверху шихты, аэродинами-

ческим сопротивлением воздуха в узком пространстве трамбовочного короба. Тем не менее, форма ударного импульса хорошо идентифицируется, что позволяет с достаточной точностью установить моменты его начала и окончания (т.е., определить продолжительность импульса), а также пиковое значение ускорения.



**Рис. 4. Характерная осциллограмма виброускорений:**  
**а** — запись сессии из четырех ударов; **б** — укрупненно запись  
 первого удара в составе сессии

Из экспериментальных данных установлено, что ударные импульсы преимущественно симметричны и могут быть аппроксимированы полувошной синусоиды. При этом ударный импульс в нижней части молотка, как правило, имеет более сложную форму, чем в верхней. Верхняя часть молотка в среднем характеризуется более интенсивными ударными импульсами (пиковые виброускорения больше, а продолжительность импульса меньше). Далее рассмотрим количественную обработку результатов натурных измерений и полученную модель ударного импульса.

### **Статистическая обработка осциллограмм виброускорений и модель ударного импульса**

Из физико-технических соображений очевидна обратная связь между продолжительностью ударного импульса  $t_i$  и пико-

вым ускорением  $A$  при неизменной энергии удара: с увеличением продолжительности импульса энергия удара передается от одного тела к другому за большее время, чему соответствует снижение пикового ускорения. Увеличение продолжительности при одновременном снижении пикового ускорения ударного импульса соответствует снижению его интенсивности.

В верхней части молотка наиболее интенсивный импульс характеризуется продолжительностью 23 мс и пиковым ускорением 28,3g, наименее интенсивный — соответственно значениями 55 мс и 6,5g ( $g$  — ускорение свободного падения). Усредненные для 43 ударов значения составляют 35,4 мс и 18,1g. В нижней части молотка наиболее и наименее интенсивные импульсы характеризуются парами значений 29 мс и 24,0g, 66 мс и 5,5g. Усредненные для 50 ударов значения составляют 41,0 мс и 14,0g. Таким образом, в верхней части молотка по сравнению с нижней частью продолжительность ударных импульсов меньше на 14%, а пиковое ускорение — больше на 28%. Эти отличия предположительно обусловлены следующими эффектами. В верхней части молотка вибродатчик установлен на торцевой поверхности штанги (рис. 3, а), являющейся естественной границей распространения и отражения ударной волны. Приняв скорость распространения продольной волны в стали порядка 6000 м/с и учитывая высоту молотка, получаем ориентировочное время прохождения ударной волны до датчика в верхней его части  $12,55/6000 = 0,002 \text{ с} = 2 \text{ мс}$ . Это означает, что в течение продолжительности импульса ударная волна многократно достигает поверхности установки датчика и отражается от нее. Возникающая при этом интерференция волн приводит к изменению характеристик регистрируемого ударного импульса.

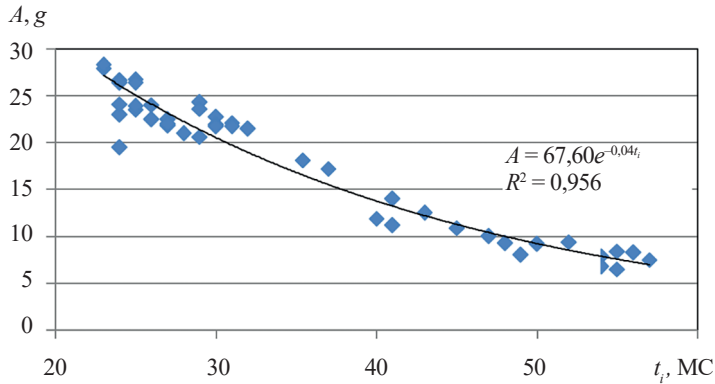
Для предварительной оценки адекватности полученных результатов целесообразно по возможности сравнить их с аналогичными результатами других исследователей.

В литературе практически отсутствуют данные о характеристиках ударного импульса при трамбовании угольной загрузки. В качестве экспериментальных данных других авторов упомянем продолжительности ударного импульса 28 мс (при отсутствии информации о массе и высоте падения молотка) [18] и 45 мс (при падении молотка неуказанной массы с высоты 0,5 м) [4]. Эти данные одного порядка с результатами наших экспериментов и косвенно подтверждают их адекватность, по крайней мере, в части продолжительности ударных импульсов.

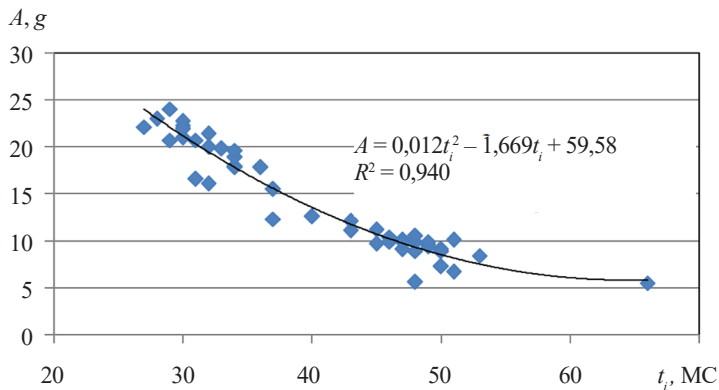
Исходя из этих соображений статистическая обработка экспериментальных данных выполнена независимо для массивов результатов, полученных для верхней и нижней частей молотка. С использованием метода наименьших квадратов найдены аппрок-

симирующие зависимости, наилучшим образом описывающие экспериментальные данные. Степень соответствия этих зависимостей результатам эксперимента оценивается коэффициентом детерминации  $R^2$ , характеризующим долю дисперсии зависимой переменной, объясняемую независимой переменной.

Для результатов, полученных в верхней части молотка, аппроксимирующая зависимость имеет вид показательной функции  $A = 67,60e^{-0,04t_i}$  с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,956$  (рис. 5, а). Для результатов в нижней части молотка аппроксимирующая зависимость принимает вид квадратичной функции  $A = 0,012t_i^2 - 1,669t_i + 59,58$  с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,940$  (рис. 5, б). Таким образом, не менее 94 % пикового ускорения обусловлены продолжительностью ударного импульса.



а



б

**Рис. 5. Взаимосвязь экспериментальных значений продолжительности импульса и пикового ускорения для верхней (а) и нижней (б) части молотка**

Таким образом, полученные экспериментальные результаты позволяют записать выражение для ударного импульса в терминах виброускорений в виде, непосредственно соответствующем результатам эксперимента:

$$a_t = A \cdot \sin\left(\frac{t}{t_i} \pi\right). \quad (1)$$

где  $a_t$  — ускорения в момент времени  $t$  в пределах продолжительности импульса.

Исходя из общепринятого понимания ударного импульса как импульса ударной силы, действующей на каждое из соударяющихся тел при ударе, далее преобразуем ударный импульс из единиц виброускорений в единицы усилий. Исходя из второго закона Ньютона выражение для ударного импульса в единицах усилий имеет вид

$$F_t = mA \cdot \sin\left(\frac{t}{t_i} \pi\right). \quad (2)$$

Тогда пиковые значения усилий в верхней части молотка заключены в интервале от 43,3 до 163,5 кН, а в нижней части — от 42,2 до 127,6 кН.

### Заключение

Для типового оборудования трамбования угольной загрузки в условиях коксохимического производства на основании экспериментальных исследований получена математическая модель ударного импульса, описываемая полуволной синусоиды и характеризующаяся интервалом возможных значений продолжительности импульса и пиковых значений ускорений и усилий.

Результаты измерений в нижней части молотка получены в зоне, достаточно близкой к зоне непосредственного ударного взаимодействия (расстояние по вертикали порядка 260 мм). Учитывая величину отличия результатов для верхней и нижней частей молотка, отстоящих друг от друга на расстоянии порядка 12,3 м, можно сделать допущение, что результаты измерений в нижней части с точностью, достаточной для инженерных решений, справедливы и для зоны непосредственного ударного взаимодействия.

Очевидно, полученные результаты строго справедливы только для рассматриваемой конфигурации трамбовочного оборудования и состава угольной загрузки при проведении натурных экспериментов. Их можно использовать для проектных расчетов оборудования с аналогичными параметрами. Однако в условиях фактически полного отсутствия данных об ударных импульсах

при трамбовании угольной загрузки полученные модели можно использовать в качестве ориентировочных нагрузок и для оборудования с существенно отличающимися параметрами. В последнем случае необходим дополнительный качественный анализ получаемых результатов. Так, например, если в проектируемой конфигурации оборудования молотки легче и падают с меньшей высоты, то полученные оценки нагруженности окажутся в запас прочности. Соответственно при увеличении энергии удара (увеличении массы и/или высоты падения молотка) результаты анализа нагруженности предположительно будут занижены и возникнет необходимость в увеличении коэффициентов запаса, степень которого в первом приближении может быть обоснована с привлечением экспертных знаний.

### Список использованной литературы

1. Леш Р. Ситуация с мировыми запасами коксующихся углей. Технология трамбования угольной шихты как способ решения проблемы / Р. Леш. — EDN VKYCCF // Кокс и химия. — 2015. — № 12. — С. 44–47.
2. Кузниченко В.М. Особенности термохимических превращений при коксовании трамбованной угольной загрузки / В.М. Кузниченко // Углекислотный журнал. — 2010. — № 3-4. — С. 66–72.
3. Кривонос В.В. Теоретические аспекты процесса трамбования угольных шихт / В.В. Кривонос // Кокс и химия. — 2002. — № 10. — С. 20–24.
4. Wang J. Stamping coal cake simulation with Duncan-Kelvin-Maxwell constitutive relations / J. Wang, D. Wang, H. Zhao // Ironmaking and Steelmaking. — 2014. — Vol. 41, no. 10. — P. 769–775.
5. Kuyumcu H.Z. Compacting of coals in cokemaking / H.Z. Kuyumcu // New trends in coal conversion: combustion, gasification, emissions, and coking. — Cambridge, 2019. — P. 293–334.
6. Пановко Г.Я. Динамика вибрационных технологических процессов / Г.Я. Пановко. — Москва : Регулярная и хаотическая динамика, 2019. — 176 с.
7. Хархута Н.Я. Машины для уплотнения грунтов: теория, расчет и конструкции / Н.Я. Хархута. — Ленинград : Машиностроение, 1973. — 176 с.
8. Гольдсмит В. Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел / В. Гольдсмит. — Москва : Стройиздат, 1965. — 448 с.
9. Пановко Я.Г. Введение в теорию механического удара / Я.Г. Пановко. — Москва : Наука, 1977. — 224 с.
10. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко. — Москва : Наука, 1967. — 444 с.
11. Александров Е.В. Прикладная теория и расчеты ударных систем / Е.В. Александров, В.Б. Соколинский. — Москва : Наука, 1969. — 201 с.
12. Манжосов В.К. Модели продольного удара / В.К. Манжосов. — Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2006. — 160 с.
13. Боровин Г.К. Обобщенная модель удара Герца-Ханта-Кроссли / Г.К. Боровин, В.В. Лапшин. — DOI 10.18698/1812-3368-2018-6-18-30. — EDN VPKQMC // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия естественные науки. — 2018. — № 6. — С. 18–30.
14. Малков О.Б. Расчет ударных импульсов в ступенчатых стержневых системах / О.Б. Малков. — Омск, 2000. — 112 с.



15 Жуков И.А. Теоретические основы синтезирования форм бойков ударных систем технологического назначения / И.А. Жуков, Е.В. Сараханова. — EDN KYSG LZ // Известия Томского политехнического университета. — 2009. — Т. 315, № 2. — С. 173–177.

16 Бауков Ю.Н. О форме ударного импульса при исследованиях изгибных колебаний упругих пластин / Ю.Н. Бауков, Е.А. Райковская, О.А. Ильина. — EDN LACIJJ // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2009. — № 8. — С. 207–211.

17 Ишин Н.Н., Гоман А.М., Скороходов А.С. Определение параметров ударного импульса в зацеплении прямозубых цилиндрических колес с учетом упругости валов и подшипников / Н.Н. Ишин, А.М. Гоман, А.С. Скороходов. — EDN QZPSCN // Механика машин, механизмов и материалов. — 2012. — № 2. — С. 37–40.

18. Sand A. DEM modeling and simulation of coal compacting by stamping / A. Sand, J. Rosenkranz, H.Z. Kuyumcu // Conference in Minerals Engineering. — 2012. — P. 123–137.

### References

1. Lesh R. The situation with global coking coal reserves. Coal charge compaction technology as a way to solve the problem. *Koks i khimiya = Coke and Chemistry*, 2015, no. 12, pp. 44–47. (In Russian). EDN: VKYCCF.

2. Kuznichenko V.M. Features of thermochemical transformations during coking of rammed coal loading. *Uglekhimicheskii zhurnal = Coal Chemical Journal*, 2010, no. 3-4, pp. 66–72. (In Russian).

3. Krivonos V.V. Theoretical aspects of the process of compacting coal charges. *Koks i khimiya = Coke and Chemistry*, 2002, no. 10, pp. 20–24. (In Russian).

4. Wang J., Wang D., Zhao H. Stamping Coal Cake Simulation with Duncan-Kelvin-Maxwell Constitutive Relations. *Ironmaking and Steelmaking*, 2014, vol. 41, no. 10, pp. 769–775.

5. Kuyumcu H.Z. Compacting of Coals in Cokemaking. In *New Trends in Coal Conversion: Combustion, Gasification, Emissions, and Coking*. Cambridge, 2019, pp. 293–334.

6. Panovko G.Ya. *Dynamics of vibration technological processes*. Moscow, Regular and Chaotic Dynamics Publ., 2019. 176 p.

7. Kharkhuta N.Ya. *Machines for soil compaction: theory, calculations and designs*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1973. 176 p.

8. Goldsmith W. *Impact. The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids*. London, 1960. 379 p. (Russ. ed.: Goldsmith W. *Impact. The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids*. Moscow, Stroiizdat Publ., 1965. 448 p.).

9. Panovko Ya.G. *Introduction to Mechanical Shock Theory*. Moscow, Nauka Publ., 1977. 224 p.

10. Timoshenko S.P. *Fluctuations in engineering*. Moscow, Nauka Publ., 1967. 444 p.

11. Aleksandrov E.V., Sokolinskii V.B. *Applied theory and calculations of shock systems*. Moscow, Nauka Publ., 1969. 201 p.

12. Manzhosov V.K. *Longitudinal impact models*. Ulyanovsk State Technical University Publ., 2006. 160 p.

13. Borovin G.K., Lapshin V.V. Generalised Hertz — Hunt — Crossley Collision Model. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya estestvennye nauki = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*, 2018, no. 6, pp. 18–30. (In Russian). EDN: VPKQMC. DOI: 10.18698/1812-3368-2018-6-18-30.

14. Malkov O.B. *Calculation of shock impulses in stepped rod systems*. Omsk, 2000. 112 p.

15. Zhukov I.A., Sarakhanova E.V. Theory of Synthesizing Striker Form of Impact Systems of Engineering Assignment. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 2, pp. 173–177. (In Russian). EDN<sup>^</sup> KYSG LZ.

16. Baukov Y.N., Raykovskaya E.A., Ilyina O.A. The Impact Impulse Form when Studying the Bending Vibration of the Elastic Plates. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2009, no. 8, pp. 207–211. (In Russian). EDN: LACIJJ.

17. Ishin N.N., Goman A.M., Skorokhodov A.S. Definition of the Parameters of the Shock Pulse in the Spur Gearing, Taking into Account the Elasticity of Shafts and Bearings. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 2012, no. 2, pp. 37–40. (In Russian). EDN: QZPSCN.

18. Sand A., Rosenkranz J., Kuyumcu H.Z. DEM Modeling and Simulation of Coal Compacting by Stamping. In *Conference in Minerals Engineering*, 2012, pp. 123–137.

### Информация об авторах

**Доронин Сергей Владимирович** — кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Российская Федерация, e-mail: mr.svdoronin@yandex.ru.

**Зеленов Роман Владимирович** — заместитель начальника отдела экспертизы промышленной безопасности, ООО Научно-исследовательский центр «СибЭРА», г. Красноярск, Российская Федерация, e-mail: zelenov\_r@mail.ru.

**Рейзмунт Елена Михайловна** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Российская Федерация, e-mail: e.sigova@gmail.com.

**Черняев Анатолий Петрович** — кандидат технических наук, генеральный директор, ООО Научно-исследовательский центр «СибЭРА», г. Красноярск, Российская Федерация, e-mail: src@src-sibera.ru.

### Information about the Authors

**Sergey V. Doronin** — PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Krasnoyarsk, Russian Federation, e-mail: mr.svdoronin@yandex.ru.

**Roman V. Zelenov** — Deputy Head of the Industrial Safety Examination Department, SibERA Scientific Research Center LLC, Krasnoyarsk, Russian Federation, e-mail: zelenov\_r@mail.ru.

**Elena M. Reizmunt** — PhD in Technical Sciences, Senior Researcher, Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Krasnoyarsk, Russian Federation, e-mail: e.sigova@gmail.com.

**Anatoly P. Chernyaev** — PhD in Technical Sciences, CEO, SibERA Scientific Research Center LLC, Krasnoyarsk, Russian Federation, e-mail: src@src-sibera.ru.

### Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Contribution of the Authors**

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

### **Для цитирования**

Доронин С.В. Модель ударного импульса при трамбовании угольной загрузки для производства кокса / С.В. Доронин, Р.В. Зеленов, Е.М. Рейзмунт, А.П. Черныяев. — DOI 10.17150/2713-1734.2023.5(4).392-408. — EDN MLZRBW // *System Analysis & Mathematical Modeling*. — 2023. — Т. 5, № 4. — С. 392–408.

### **For Citation**

Doronin S.V., Zelenov R.V., Reizmunt E.M., Chernyaev A.P. Shock Impulse Model when Compacting a Coal Load for Coke Production. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2023, vol. 5, no. 4, pp. 392–408. (In Russian). EDN: MLZRBW. DOI: 10.17150/2713-1734.2023.5(4).392-408.