

*Е. Г. Куликова<sup>1\*</sup>, С. Я. Левенсон<sup>1</sup>*

## **Вибрационное устройство для уплотнения твердеющих закладок на основе вяжущего компонента в условиях шахтного пространства**

<sup>1</sup> Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: shevchyk\_78@mail.ru

**Аннотация.** Рассмотрен вопрос закладки выработанного пространства шахт с целью повышения устойчивости горного массива, обеспечения безопасности подземной добычи полезных ископаемых и предотвращения просадки почв в области проведения горных работ. Особое внимание уделено технологии уплотнения твердеющей закладки смесями на основе вяжущего компонента, таких как бетонные смеси. Приведен аналитический обзор оборудования, осуществляющего глубинное и поверхностное вибрационное уплотнение бетонных смесей. Описано вибрационное устройство разработки ИГД СО РАН, способное самостоятельно перемещаться по поверхности бетонной смеси и уплотняющее ее в режиме полигармонических колебаний, что способствует повышению плотности и прочности закладочного массива. Описана технология выполнения послойной закладки выработанного шахтного пространства с непрерывным уплотнением закладываемой смеси с помощью предложенного вибрационного устройства.

**Ключевые слова:** выработанное шахтное пространство, твердеющая закладка, поверхностное уплотнение, вибрационное устройство, дебалансный вибровозбудитель, упругое основание, полигармонические колебания, лопастной движитель

*E. G. Kulikova<sup>1\*</sup>, S. Ya. Levenson<sup>1</sup>*

## **Vibrating equipment for mine room compacting hardening backfills based with binder component**

<sup>1</sup> Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: shevchyk\_78@mail.ru

**Abstract.** The problem of backfilling the mined-out room of mines was formulated in order to increase the stability of the rock mass, ensure the safety of underground mining and prevent soil subsidence in the area of mining operations. Particular attention is paid to the technology of hardening filling with mixtures based on a binder component, such as concrete mixtures. An analytical review of equipment that performs deep and surface vibratory compaction of concrete mixtures is presented. The vibration equipment developed by the Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, capable of independently moving over the surface of the concrete mixture and compacting it in the mode of polyharmonic vibrations, which contributes to an increase in the density and strength of the backfill stone is presented. The technology for performing layer-by-layer backfilling of a mined-out room with continuous compaction of the poured mixture using the proposed vibration equipment is presented.

**Keywords:** mined-out room, hardening backfill, surface compaction, vibration equipment, unbalance vibration exciter, elastic base, polyharmonic vibrations, open-rotor mover

## *Введение*

Одной из основных задач, решаемых при разработке технологий добычи полезных ископаемых, является обеспечение безопасности проведения подземных работ. Причем это касается как самого процесса добычи, так и его последствий. Выработанное шахтное пространство приводит к усложнению напряженно-деформированного состояния горного массива и к опасности завала. Аварийная ситуация может усугубляться близким расположением подземных вод и вероятностью их прорыва в выработанное пространство. Помимо этого, подземные выработки небольшой глубины являются причиной просадки и растрескивания земной поверхности, что наносит урон экологии осваиваемой области.

В связи с этим применяются технологии с частичной или полной закладкой выработанного пространства, позволяющей повысить устойчивость породного массива. Применение закладочных комплексов повышает экономические вложения и себестоимость добываемых материалов. Использование гидравлической закладки и сухой закладки мелкодроблёных и крупнодроблёных пород с последующим их уплотнением [1–8] позволяет частично снизить стоимость работ, однако не может считаться универсальным решением для различных месторождений полезных ископаемых. В некоторых случаях применение таких видов закладки приводит к проникновению закладочного материала в руду, и впоследствии, к увеличению ее разубоживания, что негативно влияет на показатели извлечения полезных ископаемых.

Основным видом закладки, применимым в 80% случаев является твердеющая закладка на основе вяжущего компонента, подбираемого индивидуально для конкретного рудника. На территории нашей страны в большинстве случаев это комплексы с цементной вяжущей и со шлаковой вяжущей добавками [9–13].

Состав и качество материалов, применяемых для изготовления закладочных смесей определяет эффективность производства горных работ. Для снижения стоимости в их состав вводятся местные удешевленные материалы, портландцемент заменяют гранулированным шлаком. При этом удобоукладываемость цементосодержащих смесей должна обеспечивать возможность их подачи с дневной поверхности к месту закладки по трубопроводу самотеком или принудительно с помощью пневматических и вибрационных питателей [11]. С другой стороны, чрезмерное количество воды в смеси может привести к расслоению закладочного материала, и как следствие, к понижению прочности искусственного массива. Поэтому в состав смеси вводятся пластифицирующие добавки, повышающие ее транспортабельность и плотность.

Учитывая возможность неравномерного распределения составляющих компонентов в составе закладочной смеси при транспортировании самотеком, а также вытеснения более легкого заполнителя тяжелым под действием силы тяжести при подаче смеси с одного уровня на другой более низкий, качество и прочность создаваемого массива во многом зависит от способа укладки и уплотнения закладочной смеси.

## *Анализ*

Большинство существующих способов уплотнения смесей со связующей компонентой основаны на вибрационном воздействии на них. За счет вибрационного проскальзывания частиц заполнителя друг относительно друга обеспечивается снижение видимого внутреннего коэффициента, что позволяет уплотнять смесь при относительно низком силовом воздействии [14–16]. Вследствие колебаний нормального давления зерен заполнителя друг на друга значение действительной силы трения между зёрнами в отдельные интервалы времени становится меньшим ее среднего значения, что дает дополнительную возможность малой силе постоянного направления вызывать сдвиги зерен заполнителя. Благодаря вызываемым вибрацией сдвиговым деформациям уплотняемой смеси снижается ее структурная вязкость. При проскальзывании и соударении твердых частиц смеси под действием вибрации происходит освобождение некоторой доли воды, адсорбированной на поверхности частиц, в результате чего смесь обогащается свободной водой, образуемой при транспортировке и укладке закладочной смеси, и происходит действительное снижение вязкости жидкой фазы и сил трения частиц при их проскальзывании.

Для уплотнения твердеющих смесей в условиях шахтной закладки наиболее эффективно может использоваться глубинное или поверхностное уплотнение.

Глубинные вибраторы представляют собой вибронаконечник, приводимый в движение от электродвигателя через гибкий вал. При работе он погружается в смесь на всю глубину и создает колебания смеси, интенсивность которых снижается с увеличением дальности их распространения. Предельное расстояние от вибронаконечника, на котором еще происходит удовлетворительное уплотнение смеси, зависит от его кинематических параметров и диаметра, состава и консистенции закладочной смеси, глубины погружения и т.д. В процессе уплотнения вибратор перемещают по всему объему уплотняемой смеси вручную или с помощью крановой установки, постепенно поднимая его на поверхность. Такие машины могут уплотнять смесь на любую глубину, но в сравнении с другими способами обеспечивают меньшую равномерность уплотнения готового закладочного массива.

В случае поверхностного уплотнения электрические площадочные вибровозбудители передают колебания уплотняемой смеси через корытообразную прямоугольную поверхность (виброплощадки) или удлиненную балку-рейку (виброрейки) [17–19]. По сравнению с глубинными вибраторами они обеспечивают более равномерное уплотнение благодаря увеличенной опорной поверхности, однако имеют ограниченную глубину уплотнения.

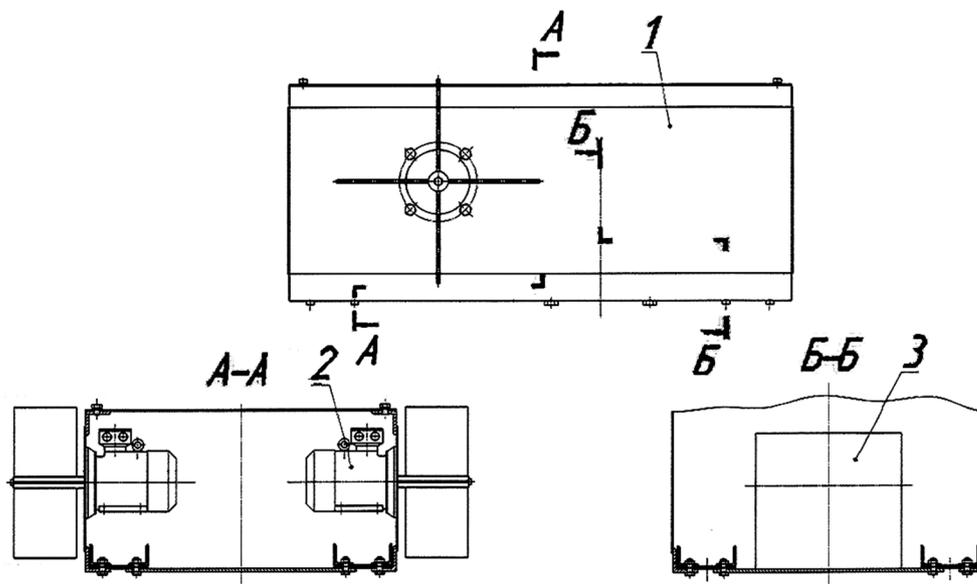
В большинстве случаев для работы существующего оборудования необходимы дополнительные механизмы для перемещения по уплотняемой поверхности. Кроме того, при доставке электрического оборудования к месту использования есть опасность попадания влаги и выхода вибровозбудителей из строя.

Поэтому продолжают поиски новых технологий и оборудования для применения в стесненных условиях выработанного пространства шахты и обеспечи-

вающего уплотнение всей закладочной смеси без присутствия оператора вблизи зоны уплотнения.

### Результаты

Конструктивная схема вибрационного устройства разработки ИГД СО РАН представлена на рисунке 1. В водонепроницаемом корпусе 1 закрепляются дебалансный источник колебаний 3 и механизмы передвижения 2.



1 – водонепроницаемый корпус, 2 – двигатели лопастных движителей, 3 – источник колебаний

Рис. 1. Компоновочная схема устройства

Днище корпуса 1 выполнено упругим. С учетом существующего опыта, накопленного в лаборатории вибротехники ИГД СО РАН по уплотнению различных дисперсных материалов [20–22] система упругого закрепления виброисточника подбирается таким образом, чтобы его работа создавала полигармонические колебания днища корпуса (рис. 2) и соответственно уплотняемого слоя закладочной смеси.

С помощью лопастного движителя корпус 1 может перемещаться по уплотняемой поверхности. Смена направления движения осуществляется за счет реверсирования роторов электродвигателей 2 (рис. 1). Работоспособность такого конструкторского решения была подтверждена в результате лабораторных испытаний макета устройства.

Предложена технология закладки шахтного пространства, в соответствии с которой закладочная смесь подается по трубопроводу 2 (рис. 3).

Начальная стадия формирования заключается в укладке несущего слоя 3 высотой около 0,4 метра, после чего на поверхность смеси с помощью лебедки опускается устройство 5. Оператор дистанционно запускает электродвигатели механиз-

мов перемещения устройства и вибровозбудитель. Уплотняющее устройство перемещается без остановок по всей поверхности закладочной смеси. Интенсивная передача вибрации в процессе движения устройства обеспечивает уплотнение и растекание смеси по всей площади камеры до горизонтального положения поверхности. После уплотнения несущего слоя, закладочная смесь постепенно добавляется непрерывным потоком при непрекращающейся работе уплотняющего устройства, которое постепенно поднимается вместе с повышением уровня закладки. После полного заполнения и уплотнения смеси ее подача по трубопроводу прекращается, а вибрационное устройство извлекается с помощью тяговой лебедки.

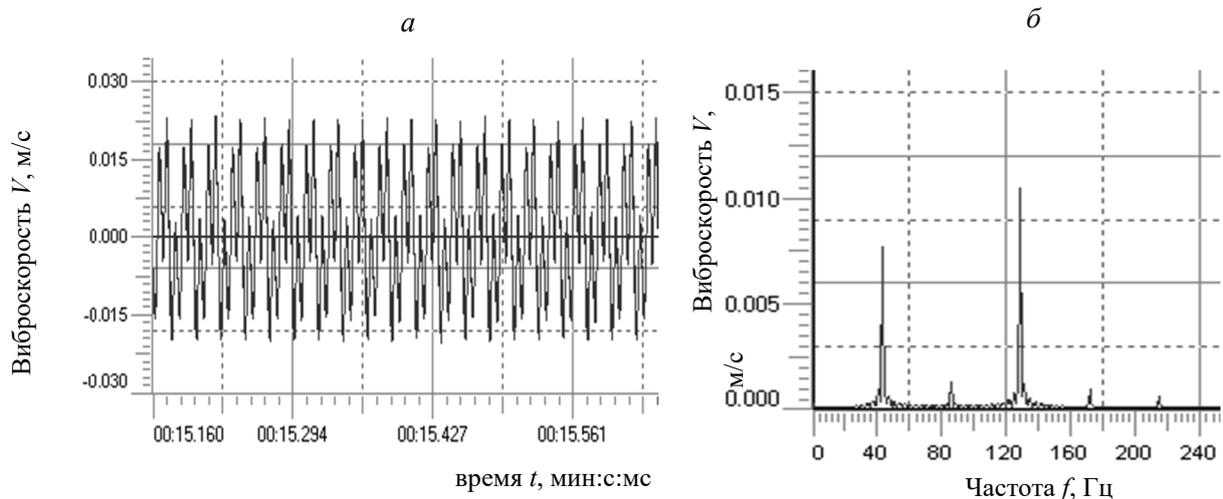
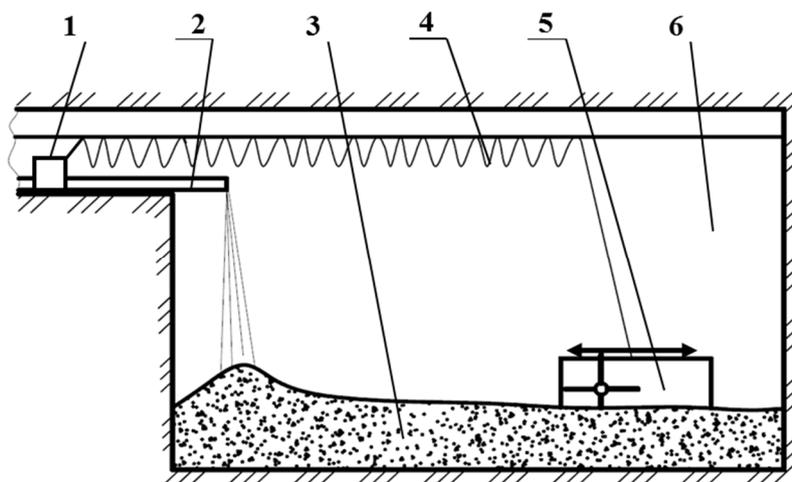


Рис. 2. Фрагмент осциллограммы виброскорости (а) и соответствующий частотный спектр (б) уплотняющей поверхности вибрационного устройства



1 – пульт дистанционного управления; 2 – подающая труба; 3 – несущий слой; 4 – электрический кабель; 5 – самоходное вибрационное устройство; 6 – камера

Рис. 3. Технологическая схема формирования закладочного массива с использованием самоходного вибрационного устройства

## *Обсуждение*

Как известно, амплитуда и частота колебаний рабочего органа уплотняющей машины назначается в зависимости от удобоукладываемости материала с вязкой компонентой и размера фракций ее заполнителей. Смеси с крупными фракциями заполнителей должны уплотняться с низкой частотой и большой амплитудой колебаний, с мелкими фракциями – вибраторами с высокой частотой и малой амплитудой колебаний. Вибрационное уплотнение в полигармоническом режиме позволяет создать спектр колебаний двух и более частот одинаковой интенсивности, приводящих в движение как крупные, так и мелкие фракции. Это дает возможность повысить эффективность и равномерность уплотнения закладочной смеси. Конструкция рассматриваемого устройства за счет подбора жесткости опорных элементов, с помощью которых дебалансный вибровозбудитель закреплен на упругом днище корпуса 1, позволяет под действием центробежной силы вибровозбудителя получить комбинацию собственных колебаний корпуса и источника колебаний с усилением второй или третьей гармоники (рис. 2). Как показывают результаты лабораторных исследований виброобработки бетонных смесей, усиление третьей гармоники в спектре собственных частот позволяет повысить плотность материала на 10 ...15 % при равных затратах мощности вибровозбудителя в сравнение с уплотнением в гармоническом режиме колебаний.

В свою очередь, герметичный корпус и лопастной движитель обеспечивают подвижность устройства вдоль уплотняемого слоя, изменение его скорости и направления движения без использования в заполняемом пространстве дополнительных подъемно-транспортных механизмов.

## *Заключение*

1. На основе анализа существующих способов вибрационного уплотнения материалов с вязущей компонентой было разработано плавучее устройство, реализующее поверхностное уплотнение твердеющих закладочных смесей в режиме полигармонических колебаний. Благодаря такому режиму работы повышается эффективность и качество уплотнения многокомпонентных материалов с различной удобоукладываемостью, что обеспечивает получение прочного закладочного массива.

2. Разработана технология послойной закладки и уплотнения твердеющих закладочных смесей с помощью предложенного вибрационного устройства, позволяющая достичь максимальной плотности твердеющей закладки.

Работа выполнена в рамках проекта НИР (№ государственной регистрации 121052600390-5).

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Уфимцев В. М., Ушенина Н. А. Твердеющая закладка горных выработок на основе золы теплоэлектростанции // Известия вузов. Горный журнал. – 2010. – № 4. – С. 7–9.
2. Коликов К. С., Мазина И. Э., Урузбиева А. Г. Закладка выработанного пространства как способ снижения негативного экологического воздействия при подземной угледобыче // ГИАБ – 2015. – №5. – С. 252–259.

3. Аглюков Х. И. Технология погашения выработанного пространства уплотненной закладкой как новый принцип управления горным давлением // Известия вузов. Горный журнал – 2010. - №6. – С. 7–14.
4. Габараев Г. О., Разоренова Е. Ю., Стась В. П., Стась П. П. Механизм работы твердеющих закладочных смесей // Вектор ГеоНаук – 2020. – № 3(4). – С. 8–20.
5. Ковальский Е. Р., Громцев К. В. Разработка технологии закладки выработанного пространства при выемке // Записки Горного института. – 2022. – Т. 254. – С. 202–209.
6. Голик В. И., Исмаилов Т. Т. Управление состоянием массива. – М.: МГГУ. – 2005. – 395 с.
7. Исмаилов Т. Т., Эздеков М. В. Концепция комбинирования геотехнологий // ГИАБ. – 2006. – № 8. – С. 23–28.
8. Яхеев В. В., Мишанов В. А. Применение рудной подготовки при отработке рудных тел с твердеющей закладкой как способ защиты от горных ударов // Рудник будущего. – 2011. - № 2. – С. 24–29.
9. Голик В. И., Масленников С. А. Требования к бетонам при поземной добыче руд // Технологии бетонов. – 2015. – № 7 – 8. – С. 39–41.
10. Рыжих В. Д., Махортов Д. С., Синьков Д. А. Основные требования и условия производства закладочных массивов // В сборнике: Международная научно-техническая конференция молодых ученых. – Белгород, 2020. – С. 1527–1531.
11. Хайрутдинов М. М., Шаймьярдянов И. К. Подземная геотехнология с закладкой выработанного пространства: недостатки, возможности совершенствования // ГИАБ – 2009. – №15 – С. 240–250.
12. Смеси для закладки выработанного пространства рудников. [Электронный ресурс]. URL: [https://ggf.bsu.edu.ru/Conferences/Conf\\_2011/Materials/Moldobaeva2.htm](https://ggf.bsu.edu.ru/Conferences/Conf_2011/Materials/Moldobaeva2.htm).
13. Агеева М. С., Лесовик Г. А., Сопин Д. М. Закладочные смеси на основе техногенного сырья. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова – 2014. – 160 с.
14. Кузнецова Ю. А. Технология уплотнения бетонной смеси // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2017. – Т.1. – С. 319–323.
15. Иванченко Т. А., Иванченко А. Е. Устройство фундаментов из жестких бетонных смесей с применением виброимпульсного уплотнения // В сборнике: Строительные материалы, конструкции и технологии XXI века. Межвузовский сборник научных трудов. Под редакцией М.Б. Пермякова. – Магнитогорск, 2019 – С. 93–97.
16. Плотникова Л. Г. Формование бетонных и железобетонных изделий и конструкций. Учебное пособие для СПО – Саратов, Москва – 2021.
17. Яковлев А. В., Морев А. С. О виброплощадке для уплотнения бетонных смесей. // Сборник материалов конференции «Семьдесят четвертая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием». – Ярославль. – 2021. – С. 351–354.
18. Гончаревич И. Ф., Гудушаури Э. Г. Некоторые аспекты современного развития вибрационной техники // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2008. – № 5. – С. 116–120.
19. Васильев В. Г. Анализ конструкций виброплощадок с многокомпонентными колебаниями для формования железобетонных изделий // Сб. межд. научно-практич. конф. «Актуальные проблемы развития дорожного комплекса». – Белгород. – 2016. – С. 7–14.
20. Морозов А. В., Гендлина Л. И., Усольцев В. М. О создании стенда с полигармоническим источником вибрации для исследования процесса уплотнения дисперсного материала в замкнутом объеме // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2018. – Том 5. – № 2. – С. 283–288.
21. Морозов А. В., Левенсон С. Я., Усольцев В. М. Вибрационное оборудование для формирования массива сыпучего материала, уплотненного в ограниченном пространстве // Научно-

емкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов – Новокузнецк, 2019. – № 5 – С. 165–169

22. Морозов А. В., Усольцев В. М. Уплотнение дисперсных материалов рабочим органом с полигармоническим источником колебаний // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2019. XV Международ. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. материалов. – Новосибирск: СГУГиТ, 2019 – Т. 2 – № 4 – С. 182–189.

© *Е. Г. Куликова, С. Я. Левенсон, 2023*