

Е.С. Запара  
М.В. Полушина

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ЛОПАСТЕЙ В ВИБРОКИПАЮЩЕМ СЛОЕ ПОРОШКООБРАЗНОГО МАТЕРИАЛА

*В работе описан лабораторный стенд, который позволяет измерять силы взаимодействия лопастей с потоком виброкипящего порошкообразного материала. С использованием положений теоретической механики и теории размерностей составлено уравнение для определения составляющей сопротивления трения при указанном взаимодействии. Показатель степени зависимости сопротивления трения от скорости потока и коэффициент трения для смеси материалов получены в результате статистической обработки экспериментальных данных испытаний двух гладких пластин, которые были ориентированы вдоль потока среды. При опытах изменяли скорость движения пластин в диапазоне до 4,54 м/с и заглубление их центра площади в материал – до 32 мм. В результате показатель степени составил 0,47, коэффициент трения – 2,9, среднеквадратическое отклонение отдельных измерений силы трения от ее расчетных значений – 1,66 Н.*

*Ключевые слова: виброкипящий слой, порошкообразный материал, лопасть, гладкая пластина, сопротивление трения.*

**Постановка проблемы.** Современные процессы переработки и обогащения полезных ископаемых, технологии порошковой металлургии, производства сварочных материалов, подготовка сухих строительных смесей и др. требуют эффективных смесителей порошкообразных материалов. Известен способ интенсификации процесса смешения указанных материалов путем приведения их в псевдокипящее состояние под воздействием воздушного потока, который проблематично использовать для получения шихты из материалов с существенно отличающейся плотностью и крупностью из-за уноса легких фракций системами вентиляции и пылеулавливания. В этих случаях, к которым относится большинство развивающихся новых технологий, более подходит способ приведения материалов в виброкипящее состояние. Кроме того этот способ потенциально является менее энергозатратным, т. к. не предполагает использование компрессоров. Для обоснованного выбора параметров смешивающих лопастей необходимо знать структуру сил взаимодействия с материалом, разработать методы расчета, что позволит рационализировать конструкции смесителей по критериям эффективности формирования смешивающих потоков и минимизации затрат энергии.

**Связь с научными и практическими результатами.** Впервые экспериментальные исследования виброкипящего слоя проведены Членовым В.А. и Михайловым И.В. [1]. Сделанное ими открытие насосного эффекта, которым обладает слой виброкипящего материала, пролило свет на причину появления разнообразных потоков материала в нем - за счет прокачивания через себя воздуха. Также установлено, что эта среда обладает вязкостью как воздух или вода. Теоретические основы гидродинамики псевдокипяще-

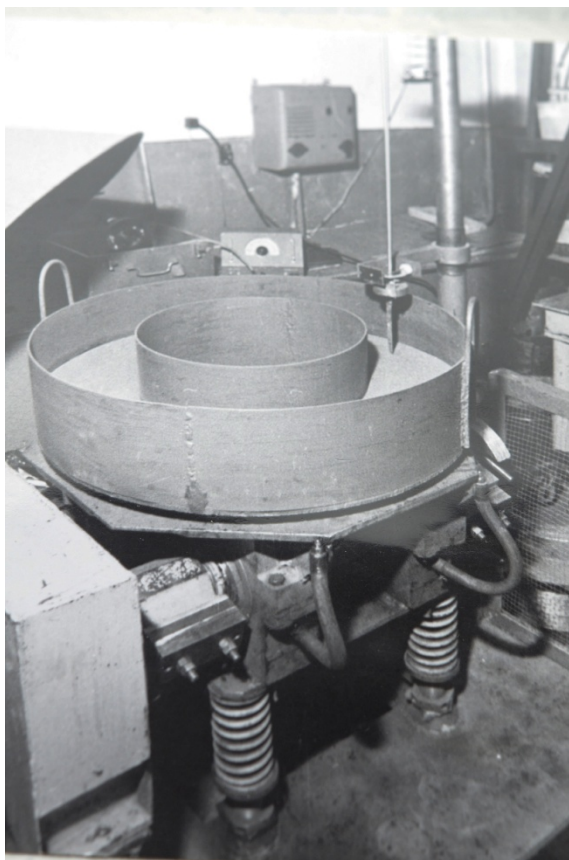
го слоя получили развитие в работе Протодяконова И.О. и Чеснокова Ю.Г. [2]. В работе [2] исследована технологическая эффективность работы вибрационных смесителей. Анализ этих и других источников информации позволил сделать следующее предположение. Исходя из того, что порошкообразный материал в виброкипящем состоянии проявляет свойства аналогичные воздуху и воде следует ожидать аналогии и во взаимодействии его с лопастями смесителя. Для расчета крыльев самолетов, судов и лопастей мешалок для жидкостей используют формулы, полученные полуэмпирическим методом по результатам экспериментальных исследований в аэродинамических трубах и опытовых бассейнах.

**Цель работы.** Исследовать особенности взаимодействия лопастей с порошкообразным материалом, приведенным в виброкипящее состояние, и получить аналитическую зависимость для расчета составляющей трения в их лобовом сопротивлении.

**Основная часть.** Для достижения цели разработан и изготовлен соответствующий стенд (рис. 1). Из-за проявления насосного эффекта виброкипящего слоя и наличия отклонений размеров деталей вибровозбудителя от номинальных в пределах полей допусков практически невозможно добиться необходимой для исследований достаточно ровной и горизонтальной поверхности материала в вибрирующей емкости. При указанных условиях материал всегда смещается в одну из сторон, образуются разнонаправленные, конвективные потки и волны на поверхности, носящие стохастический характер. Для возможности управления и стабилизации потока вибровзвешенного материала принято решение поместить его в кольцевой желоб, име-

ющий наружный диаметр 860 мм и поперечное сечение 200 на 200 мм.

Кольцевой желоб установлен на шести-дебалансный вибровозбудитель, который генерирует синхронные вертикальные и крутильные колебания, при которых каждая точка рабочей поверхности колеблется вдоль своей винтовой линии с осью, совпадающей с вертикальной осью вибровозбудителя. Конструкция позволяет регулировать амплитуду вертикальных колебаний в диапазоне от 0 до 4 мм. Крутильные колебания регулировались таким образом, что на внешнем диаметре желоба амплитуда горизонтальной составляющей колебаний изменялась от 0 до 8 мм. Скорость вращения валов регулировали при помощи двигателя постоянного тока в пределах от 61 до 85 рад/с.



**Рис. 1.** Вибрационный стенд для создания потока вибровзвешенного материала

При проведении экспериментальных исследований использована шихта, содержащая 6 компонентов с разными физико-механическими свойствами одного из производств, включая рутиловый концентрат, ферромарганец, кремнефтористый натрий, железный порошок, с насыпной плотностью  $2810 \text{ кг/м}^3$ . Уровень заполнения желоба покоящейся шихтой составлял 60 мм. Опытным путем были подобраны параметры колебаний, которые обеспечивают приведение шихты в виброкипящее состояние с устойчивым,

равномерным поступательным движением по кольцевому желобу с максимальной линейной скоростью  $0,19 \text{ м/с}$  вдоль его оси. При этом высота слоя увеличивалась до 70 мм, коэффициент разрыхления составил 1,17, что соответствует режиму интенсивного виброкипания материала [1], амплитуда вертикальных колебаний – 3,6 мм, горизонтальных – 8 мм, частота колебаний – 78,5 рад/с. Следует отметить, что поток материала имеет постоянную угловую скорость и, следовательно, разную линейную во всех радиальных сечениях желоба. Это обеспечивает одинаковую высоту виброкипящего слоя по всего его площади. Конструктивно это определено возрастанием амплитуды горизонтальной составляющей колебаний рабочей поверхности желоба, пропорционально увеличению расстояния точки наблюдения от вертикальной оси вибровозбудителя.

Для оценки уровня и характера изменения сил взаимодействия лопастей от скорости потока виброкипящего материала проведены предварительные эксперименты. Скорость потока регулировалась изменением массы дебалансов, создающих крутильные колебания, в диапазоне  $0,08 - 0,19 \text{ м/с}$ . При этом амплитуда вертикальных колебаний и, соответственно, коэффициент разрыхления оставались постоянными. В поток вертикально опускали гладкие пластины и лопасти с разным профилем. Лопасти закреплялись с одной стороны рычага, имеющего горизонтальную ось вращения, другую сторону рычага опирали на пружинный грамометр. Располагая ось вращения поперек и вдоль потока, измеряли силы сопротивления движению лопасти и подъемную соответственно. Угол атаки к набегающему потоку задавали поворотом вокруг вертикальной оси при помощи встроенного транспортира (рис. 1). Эксперименты показали, что характер изменения указанных сил взаимодействия аналогичен соответствующим силам взаимодействия лопастей с потоками жидкости и газа. Поэтому в работе использована аналогичная терминология и способ разложения результирующей силы от давления потока среды на поверхность лопасти на составляющие – силу лобового сопротивления, действующую вдоль потока, подъемную силу, направленную перпендикулярно потоку и образующей линии поверхности. Третья составляющая силы – боковая, которая направлена поперек потока и, преимущественно, вдоль образующих поверхности нас пока не интересует.

Численные значения сил, полученных при предварительных экспериментах, показали, что сила лобового сопротивления лопастей в потоке виброкипящего материала, как и в потоках воды и воздуха, складывается из сопротивления трения поверхности лопасти о материал, сопротивления формы лопасти и индуктивного. Сопротивление формы лопасти зависит от профиля ее попереч-

ного сечения вдоль потока. Индуктивное сопротивление связано с расходом энергии на образование завихрений в среде, то есть турбулентного следа за лопастью.

Предварительные эксперименты и оценочные расчеты возможных значений сил, возникающих на лопастях, при используемых в смесителях линейных скоростях их движения - до 5 м/с, позволили составить исходные требования на проектирование подвесной лабораторной установки к описанному стенду (рис. 2), которая позволила провести дальнейшие исследования.

Лабораторная установка состоит из электропривода постоянного тока в составе двигателя 1 со встроенным тахогенератором, позволяющим выводить на пульт управления скорость его вращения, червячного редуктора 2 и корпуса опорных подшипников 3, которые смонтированы на подвесной раме стенда. На опорных подшипниках установлен шпindelный вал 4, на котором закреплен механизм опускания 5 коромысла 6. Измерительные балки 7 имеют прямоугольное поперечное сечение и изготовлены из стали 40Х. На четырех поверхностях каждой из них наклеены тензометрические датчики марки 2ПКБ-20-200Б. Балки одним концом заземлены на краю коромысла 6 в вертикальном положении. На нижнем конце каждой балки посредством соосного с ней шарнира устанавливали исследуемую лопасть 8. Шарнир и закрепленный на нем транспортер позволяют выставить необходимый угол атаки лопасти к потоку среды. Измерительные балки ориентированы таким образом, что одна пара тензометрических датчиков регистрирует изгибную деформацию балки, вызванную силой сопротивления движению лопасти в материале, а другая – деформацию, вызванную подъемной силой на лопасти.

Тензодатчики включены в измерительную систему 8 АНЧ по мостовой схеме. Сигнал от вращающихся частей передается посредством скользящих контактов, выполненных в виде лент с углом обхвата колец 250°. Эти контакты обеспечивают колебания переходного сопротивления не более 5 % от измеряемой величины. Запись сигналов производили шлейфовым осциллографом НО41У42. На осциллограммы выводились графики четырех сил, метки времени через 0,1 с и каждого оборота коромысла, позволяющие точно определить скорость движения лопасти.

Масштабирование и тарировку измерительной аппаратуры производили при помощи гири Г4-111-10 с погрешностью 1 %, силу веса посредством нити и отклоняющего блока прикладывали к центру площади части лопасти, погружаемой в материал, поочередно в направлении движения и перпендикулярном ему. Тарировку производили для случая, когда центр площади погружен в материал на глубину 25 мм. Обработку экспериментов при других глубинах

погружения лопастей производили с учетом поправочного коэффициента, пропорционального изменению длины плеча до центра площади погруженной части лопасти.

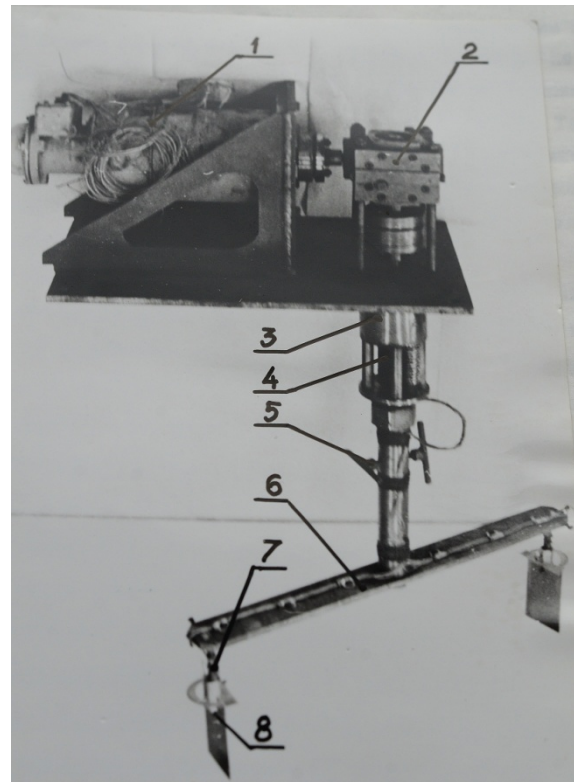


Рис. 2. Подвесная лабораторная установка

Исследуемым лопастям придавалось движение вдоль кольцевого желоба с плавно регулируемой скоростью в диапазоне от 0 до 4,5 м/с. Направление вращения коромысла задавалось встречным по отношению к скоростному потоку материала, образованного эффектом вибро-транспортирования. Скорость потока, как и ранее, составляла 0,19 м/с. Для повышения точности получаемых результатов испытания подвергались одновременно две одинаковые лопасти, установленные на разных концах коромысла и движущиеся в диаметрально противоположных местах кольцевого желоба.

Измерив силы лобового сопротивления для разных лопастей, невозможно выделить их составляющие. Поэтому на первом этапе исследована основная составляющая лобового сопротивления лопастей – сила сопротивления трения ее поверхности в виброкипящей среде. Принимая во внимание, что данная среда обладает вязкостью, для этого сопротивления можно записать следующую формулу:

$$F_{Tp} = \zeta \cdot N \cdot P_v, \quad (1)$$

где  $\zeta$  – коэффициент трения, зависящий от свойств материала, его состояния (в покое или в виброкипящем) и шероховатости поверхности

лопасти;  $N$  – сила нормального давления на поверхность лопасти, Н;  $\Pi_v$  – безразмерный комплекс, пропорциональный скорости потока и направленный вдоль поверхности трения.

Сила нормального давления материала на поверхность лопасти равна произведению давления его слоя на площадь поверхности трения:

$$N = \rho \cdot g \cdot h \cdot \Omega_{II}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность виброкипящего материала, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $h$  – глубина погружения центра площади лопасти в материал, м;  $\Omega_{II}$  – площадь поверхности трения лопасти, м<sup>2</sup>.

С использованием теории размерностей безразмерный комплекс для учета влияния скорости потока относительно поверхности лопасти получен в следующем виде:

$$\Pi_v = \left( \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \right)^n, \quad (3)$$

где  $v$  – скорость потока, направленного вдоль поверхности трения, м/с;  $n$  – показатель степени зависимости силы трения от скорости потока.

Для определения коэффициента трения  $\zeta$  и показателя степени  $n$  «в чистом виде» экспериментальным путем получены зависимости сопротивления от скорости движения и заглубления в среду гладких пластин. (Соответствующий термин в гидродинамике – «гидродинамически гладкая пластина», который на практике означает, что при имеющемся и меньшем уровне шероховатости в данных конкретных условиях она не влияет на величину сопротивления). При этом пластины ориентировались вдоль потока.

Испытания проведены с двумя пластинами шириной (размер вдоль потока среды)  $b=0,04$  и  $b=0,08$  м. Длины пластин  $l$  задавались заглублением их торца в материал и составляли 0,020; 0,035; 0,050 и 0,063 м, площади пластин при опытах –  $\Omega = b \cdot l$ .

Площадь поверхности трения пластины и глубина погружения ее центра площади в материал при испытаниях соответственно определялись по формулам  $\Omega_{II} = 2\Omega$  и  $h = l/2$ . С учетом этого, подставив формулы (2) и (3) в (1), получено выражение для сопротивления трения гладких пластин, помещенных в поток виброкипящего материала:

$$F_{Tp} = 2 \cdot \zeta \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot \Omega \cdot \left( \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \right)^n. \quad (4)$$

Экспериментальные исследования и их обработка производились по следующей методике. Включали привод вибровозбудителя, в результате чего материал в желобе приобретал виброкипящее состояние, и циркулировал по нему. Затем записывали линию нулевого значе-

ния силы на осциллограмму. Испытываемые пластины, сориентированные вдоль потока, вертикально опускали в материал на заданную глубину и записывали силу трения при скорости его виброперемещения 0,19 м/с. Посредством регулирования напряжения на приводе вращения коромысла задавали различные скорости движения пластин в диапазоне до 4,5 м/с и производили записи осциллограмм.

Силы взаимодействия лопастей и пластин, в частности, с виброкипящим материалом являются случайными функциями времени. Это объясняется рядом причин. Во-первых, при таком состоянии в материале постоянно наблюдаются хаотичные токи, приводящие к колебаниям сил взаимодействия. Во-вторых, эти силы промодулированы колебаниями, вызванными пульсацией среды с частотой колебаний вибровозбудителя. Поэтому обработку осциллограмм производили следующим образом. В пределах одного или двух полных оборотов коромысла, в зависимости от скорости его вращения, через равные промежутки времени, составляющие 0,1 с, измеряли ординаты полученных кривых. Число измеренных ординат при каждом опыте составляло от 10 до 26. Силу взаимодействия рассчитывали по среднему значению указанных ординат. Данные по каждой паре одновременно испытанным пластинам усреднялись. Результаты экспериментальных исследований сводились и обрабатывались в таблицах Excel.

Показатель степени  $n$  и коэффициент трения для данной смеси материалов  $\zeta$  определялись путем минимизации среднеквадратического отклонения расчетных величин силы трения от опытных одновременно для всех испытанных пластин и скоростей. расчетные значения силы трения определялись по формуле (4), среднеквадратические отклонения – по стандартной методике. В результате расчетов установлено, что  $n = 0,47$ , а  $\zeta = 2,9$ . Графически результаты представлены на рис. 3. Кривые построены по результатам теоретических расчетов, точками показаны опытные данные.

**Выводы.** В результате исследований установлено, что составляющая сопротивления трения гладких поверхностей касательному к ней потоку виброкипящего материала пропорциональна не только плотности среды, площади поверхности и скорости относительного движения тела, как в жидкости и газе, но и величине «гидростатического» давления материала в соответствии с зависимостью (4).

Достоверность полученной аналитической зависимости сопротивления трения гладких поверхностей потоку виброкипящего материала подтверждается приемлемым значением среднеквадратического отклонения отдельных измерений силы трения от ее расчетных значений, составляющим 1,66 Н. Среднеквадратическая

относительная погрешность отдельных измерений силы трения от ее расчетных значений составляет 11,2 %.

Полученные результаты позволят разработать более точные методики расчета сил взаи-

модействия для рабочих органов смесителей с вибрационным способом интенсификации процесса.

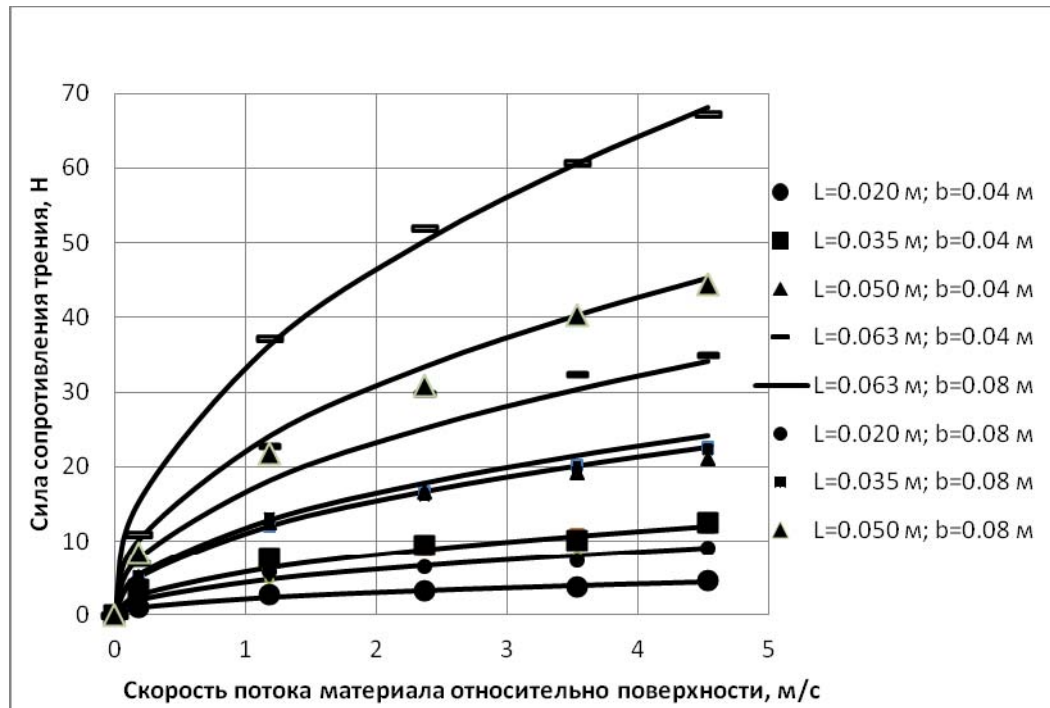


Рис. 3. Зависимость сопротивления трения гладких пластин от скорости потока и заглубления  $h$

### Список литературы

1. Членов В.А. и Михайлов И.В. Виброкипящий слой. - М.: Наука, 1972. - 341с.
2. Протодяконов И.О. и Чесноков Ю.Г. Гидродинамика псевдокипящего слоя. - Л.: Химия, 1982. - 266 с.
3. Сердюк Л.И. Осина Л.М. Исследование нестационарных режимов работы управляемых вибрационных машин // Вибрации в технике и технологи. -1999. - № 2 (11). - С. 82 - 85.

2. Protodyakonov S.J. and Chesnokov YU.G. (1982), *Gidrodinamika psevdokipyashchego sloya [Hydrodynamics of pseudo-boiling layer]*, Khimiia, Leningrad, (in Russian).

3. Serdiuk L.I. and Osina L.M. (1999), "A study of unsteady modes of operation of controlled vibrating machines" [*Issledovanie nestatsionarnykh rezhimov upravlyаемykh vibrashchionnykh mashin*], *Vibration in engineering and technology*, No2 (11), pp.82-85 (in Russian).

### References

1. Chlenov V.A. and Mikhaylov I.V. (1972), *Vibrokipyashchiy sloy [Vibro-boiling layer]*, Nayka, Moscow, (in Russian).

Надійшла до редакції 05.11.2017

Рецензент д-р. геолог. наук, проф. В.О. Привалов.

**Запара Евгений Семенович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры горных машин и инжиниринга Государственного высшего учебного заведения «Национальный горный университет» (пр. Дмитрия Яворницького, 19, Днепр, 49600, Украина)

Email: [zaparaec@ua.fm](mailto:zaparaec@ua.fm)

**Полушина Марина Витальевна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры горных машин и инжиниринга Государственного высшего учебного заведения «Национальный горный университет» (пр. Дмитрия Яворницького, 19, Днепр, 49600, Украина)

Email: [Marina.Polushina@gmail.com](mailto:Marina.Polushina@gmail.com)

### ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ ТЕРТЯ РУХУ ЛОПАТЕЙ В ВІБРОКИПЛЯЧОМУ ШАРІ ПОРОШКОВИДНОГО МАТЕРІАЛУ

**Анотація.** У роботі описаний лабораторний стенд, який дозволяє вимірювати сили взаємодії лопатей з потоком віброкиплячого порошкоподібного матеріалу. З використанням положень теоретичної механіки і теорії розмірностей складено рівняння для визначення складової опору тертя при зазначеній взаємодії. Показник степеня залежності опору тертя від швидкості потоку і коефіцієнт тертя для суміші матеріалів отримані в результаті статистичної обробки експериментальних даних випробувань двох гладких пластин, які були зорієнтовані уздовж потоку середовища. При досліджах змінювали швидкість руху пластин в діапазоні до 4,54 м/с і заглиблення їх центру площі в матеріал - до 32 мм. В результаті показник степеню склав 0,47, коефіцієнт тертя - 2,9, середньоквадратичне відхилення окремих вимірювань сили тертя від її розрахункових значень – 1,66 Н.

**Ключові слова:** віброкиплячий шар, порошкоподібний матеріал, лопать, гладка пластина, опір тертя.

**Запара Євген Семенович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гірничих машин та інженірингу Державного вищого навчального закладу "Національний гірничий університет" (пр. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, 49600, Україна).

Email: [zaparaec@ua.fm](mailto:zaparaec@ua.fm)

**Полушина Марина Віталіївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гірничих машин та інженірингу Державного вищого навчального закладу "Національний гірничий університет" (пр. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, 49600, Україна).

Email: [Marina.Polushina@gmail.com](mailto:Marina.Polushina@gmail.com)

### DETERMINATION OF THE FRICTIONAL RESISTANCE OF THE BLADES IN THE VIBRATION BED OF THE POWDERED MATERIAL

**Annotation.** In this article a laboratory bench is described, which makes it possible to measure the interaction forces of the blades with the flow of a vibro-boiling powder material. Using the methods of theoretical mechanics and the theory of dimensions, an equation for determining of the component of frictional resistance for this interaction is formulated. The exponent of frictional resistance depending on the flow velocity and coefficient of friction for a mixture of materials was obtained as a result of statistical processing of the experimental test data of two smooth plates that were oriented along the flow of the medium. During the experiments the speed of plate motion in the range up to 4.54 m / s and the penetration of their center of the area into the material - up to 32 mm were changed. As a result the exponent was 0.47, the coefficient of friction was 2.9 and the standard deviation of the individual measurements of the frictional force from its calculated values is 1.66 N.

**Keywords:** vibro-boiling layer, powder-like material, blade, smooth plate, frictional resistance.

**Ievgen Zapara** – Cand.Sc. (tech.), Senior Lecturer of State Higher Educational Institute «National Mining University» (Avenue Dmytra Yavornytskoho, 19, Dnipro, 49600, Ukraine)

Email: [zaparaec@ua.fm](mailto:zaparaec@ua.fm)

**Maryna Polushyna** – Cand.Sc. (tech.), Senior Lecturer of State Higher Educational Institute «National Mining University» (Avenue Dmytra Yavornytskoho, 19, Dnipro, 49600, Ukraine)

Email: [Marina.Polushina@gmail.com](mailto:Marina.Polushina@gmail.com)