

В.И. Дырда, д-р техн. наук, профессор
(ИГТМ НАН Украины)

ТЕОРИЯ ВОЛНОВОГО АБРАЗИВНО-УСТАЛОСТНОГО ИЗНОСА УПРУГОНАСЛЕДСТВЕННЫХ СРЕД

Аннотация. Рассматривается взаимодействие упругонаследственной сильно диссипативной среды с предельно-насыщенным двухфазным потоком. Уравнение баланса потока принимается в виде Поля-Великанова, а распределение пульсирующих значений скоростей в виде нормального распределения Гаусса. Применительно к резиновой футеровке барабанной мельницы получено уравнение для вероятной скорости изменения высоты плит футеровки по времени. Рассматриваются особенности разрушения резиновой футеровки в контексте явлений детерминированного хаоса и некоторых закономерностей движения загрузки в барабане мельницы.

Ключевые слова: резиновые футеровки; теория волнового износа; упруго-наследственные среды; детерминированный хаос; уравнение баланса потока

V.I. Dyrda, D. Sc. (Tech.), Professor,
(IGTM NAS of Ukraine),

THE THEORY OF THE WAVE ARE ABRASIVE-FATIGUE WEAR ARE ELASTIC-HEREDITARY ENVIRONMENTS

Abstract. Interaction are consider are elastic-hereditary strongly dissipation environment with extremely-saturat diphasic stream. The equation of balance of a stream are t over in the form of Pohl-Velikanov, and distribution of puls values of speeds in the form of normal distribution of Gauss. With reference to a rubber lining of a tumbling mill the equation for probable speed of change of height of plates of lining on time are receiv. It are consider features of collapse of a rubber lining in a context of the phenomena of the determin chaos and some laws of movement of loading in a barrel of a mill.

Keywords: rubber lining; theory of a wave wear; elastic-hereditary environments; the determin chaos; equation of balance of a stream

Основанием для написания настоящей статьи стала экспериментально установленная общность динамических процессов и морфометрических признаков при исследовании предельно-насыщенных русловых потоков и взаимодействия загрузки с защитной футеровкой в барабанных мельницах. Оба случая характеризуются мощной турбулентностью, а, следовательно, пульсацией скоростей и давлений; в обоих случаях наблюдаются характерные морфометрические признаки в виде «речного дна» или «речного узора». В первом случае причиной появления «речного дна» является волновой характер размыва и намыва твёрдого вещества (в большинстве рассматриваемых случаях песка); во втором случае – волновой характер абразивно-усталостного износа футеровки.

По динамике русловых потоков имеется обширная литература, достаточно назвать классическую монографию М.А. Великанова «Динамика русловых потоков», изданную в 1949 году; по динамике барабанных мельниц имеются публикации [1], в которых рассматриваются некоторые вопросы волнового износа резиновой футеровки.

Из гидродинамики известно, что массовое движение твёрдых частиц по дну потока при малых скоростях всегда происходит в форме движения волн. Эти волны двигаются со скоростью меньшей, чем скорость потока. Существует ряд теорий (например, теория Экснера, Поля и других авторов), рассматривающих деформацию размываемого дна и, в частности, движение песчаных волн. Теория Экснера и

Поля объясняют и движение песчаных волн и их деформацию в процессе движения. Приведённые ими экспериментальные данные по морфометрическим признакам в виде речного узора для потока имеет много общего с аналогичными признаками, наблюдаемыми при разрушении (абразивно-усталостном износе) резиновой футеровки в барабанных мельницах: те же смещение волн во времени и та же асимметрия по длине барабана [2].

Однако эти теории не объясняют причины возникновения волн, так как не учитывают фактор турбулентности. Великанов разработал модель возникновения песчаных волн, основываясь на рассмотрении воздействия на песчинки пульсирующих скоростей и давлений потока.

Модель основана на ряде постулатов и предпосылок, принятых в гидродинамике, суть их в следующем.

1. При шероховатом (наличие резких выступов и впадин) русле следует рассматривать лишь одно турбулентное движение потока. При этом в турбулентном движении имеются пульсации скоростей и давлений: поле скоростей и поле давлений пульсирует, т.е. их величины изменяются во времени, колеблясь около некоторого среднего значения.

2. Турбулентному потоку свойственны структурные образования, форма которых может иметь определённую закономерность, а размеры непрерывно меняются по законам случайностей; в русловых потоках структурные образования играют доминирующую роль.

3. Турбулентное движение потока состоит из ряда пульсаций: крупномасштабной пульсации, обычно отождествляемой с усреднённой, и налагаемых на это движение пульсаций поля скоростей малых масштабов. Пульсация крупного масштаба играет доминирующую роль в процессах диффузии; пульсации малых масштабов – в процессах диссипации энергии. При этом большую роль играет вязкость потока, которая осуществляет передачу движения между слоями и формирует непрерывное скоростное поле потока; аэрация, т.е. насыщение потока воздушными пузырьками при его турбулентном движении, повышает диссипацию энергии. Согласно принципу минимума диссипацию, введённому в гидродинамику Рэлеем и Гельмгольцем, из всех скоростных полей реализуются лишь те, при которых диссипация будет минимальной.

4. Между турбулентностью, как структурной формой руслового потока, и морфометрическими особенностями русла существует определённая связь. Образование волн на дне потока непосредственно связано с пульсацией скоростей, которые и определяют масштаб турбулентности. При этом именно крупномасштабные пульсации определяют геометрические размеры волн, образующихся на дне потока.

5. В турбулентном потоке распределение пульсирующих значений скоростей подчиняется вероятностным законам.

Безусловно, гидродинамическая модель Великанова, построенная для динамики песчаных волн имеет некоторое отличие от волнового износа футеровки, однако многие положения этой модели справедливы и для рассматриваемой проблемы.

Воспользуемся некоторыми положениями модели Великанова для объяснения волнового характера износа элементов резиновой футеровки в барабанных мельницах. Как известно, резина относится к упруго-наследственным средам, т.е. средам, обладающим большой диссипацией и способностью к большим обратимым деформациям.

Примем ряд допущений, которые не искажают общие представления о механизме абразивно-усталостного износа резины и не выходят за рамки принятой модели:

- в потоке существует одинаковый размер частиц (контр тел);
- уравнение баланса примем в виде Поля-Великанова (поток считается равномерным и установившимся – плоская задача)

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

где z – высота дна;
 x – координата;

$\frac{\partial p}{\partial x}$ – твёрдый сток, если $\frac{\partial p}{\partial x} > 0$ – опускание дна;

$\frac{\partial p}{\partial x} < 0$ – поднятие дна.

Возьмём отрезок по длине потока между значениями абсциссы x и $x + \delta x$; за некоторый интервал времени δt в этот отрезок войдёт объем стока $p \delta t$, а выйдет объём $(p + \frac{\partial p}{\partial x} \delta x) \delta t$.

Разность $\frac{\partial p}{\partial x} \delta x \delta t$ обуславливает на этом участке опускание дна при $\frac{\partial p}{\partial x} > 0$, т.е. размыв плиты футеровки с массопереносом частиц резины; это уравнение имеет силу для любого промежутка времени, необходимо лишь сформулировать соответствующее выражение для твёрдого расхода p :

- гидродинамические условия предполагаются неизменными, т.е. скорость потока $V = const$;
- вследствие движение пульпы как предельно-насыщенного потока, состоящего из частиц изношенных шаров и частиц руды будет происходить абразивно-усталостный износ резины; при встрече таких частиц (контртел) с футеровкой будет происходить массоперенос резины, т.е. вырыв фрагментов материала; будем считать, что вырыв одного элемента фрагмента будет зависеть от пульсации давления и контртела в потоке, т.е. по случайному закону;
- выражение для твёрдого стока примем в виде

$$p = \int_0^{\infty} D m(v) v dv, \quad (2)$$

где D – средний диаметр частиц;

m – динамический коэффициент сплошности, относящийся к совокупности частиц (контртел), движущихся со скоростями в интервале от v до $v + \delta v$; коэффициент m имеет смысл функции вероятностей или кривой распределения частиц по скоростям их движения; функция $m(v)$ по своему физическому

смыслу представляет собой величину, пропорциональную числу контртел, движущихся со скоростью v , следовательно, она должна быть пропорциональной частоте тех значений пульсирующих скоростей, которые двигают контртела именно с этими скоростями.

- распределение пульсирующих значений скорости в турбулентном потоке примем в виде нормального распределения Гаусса

$$\varphi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_u} \exp\left(-\frac{(u-\bar{u})^2}{2\sigma_u^2}\right), \quad (3)$$

где u – скорость потока;
 \bar{u} – среднее значение скорости потока;
 σ_u – среднеквадратичное отклонение.

Произведя некоторые преобразования можно получить

$$\varphi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\vartheta^2}{2}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma\sqrt{1-r^2}} \exp\left(-\frac{\mu^2}{2}\right), \quad (4)$$

где $r = \left(1 - \frac{x^2}{e^2}\right)^2$; $\mu = \frac{u' - ru_0}{\sigma\sqrt{1-r^2}} = \frac{v + u_{(0)} - u - ru_0}{\sigma\sqrt{1-r^2}}$; $\vartheta = \frac{u_0'}{\sigma}$; $u_0' = u - \bar{u}$ ($\bar{u}_0 = \bar{u}$),

l – длина дна потока (т.е. плит футеровки), представленного в безразмерном обозначении от 0 до 1;

ϑ – скорость движения контртел;

$u_{(0)}$ – скорость потока в точке $x = 0$;

u_0 – начальное значение скорости потока.

Принимая эти допущения, получим выражения для твердого стока P в виде

$$P = \frac{D}{\sqrt{2\pi}} \left\{ \alpha \exp\left(-\frac{\mu_0^2}{2}\right) - \beta \int_{\mu_0}^{+\infty} \exp\left(-\frac{\mu^2}{2}\right) d\mu \right\}. \quad (5)$$

Решая это уравнение применительно к защитной футеровки можно получить вероятную скорость изменения высоты плиты футеровки z по времени

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{kD}{l} \psi(\xi, \varepsilon, \nu), \quad (6)$$

где $\xi = \frac{x}{l}$; $\varepsilon = \frac{u_{(0)} - \bar{u}}{\sigma}$; $r = (1 - \xi^2)^2$; $\mu_0 = \frac{\varepsilon - r\nu}{\sqrt{1-r^2}}$;

$$\psi = \frac{dr}{d\xi} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1-r^2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\mu_0^2}{2}} - \nu \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mu_0}^{+\infty} e^{-\frac{\mu^2}{2}} d\mu \right\}.$$

Дальнейшее решение этого сложного уравнения возможно лишь числовыми методами.

Для значений ξ от 0 до 1 через интервалы 0,05 были вычислены значения $r, \frac{dr}{d\xi}, \frac{r}{\sqrt{1-r^2}}$ и построен график (рисунок 1) зависимости ψ от ξ для $\varepsilon = 3$ и $\nu = 3$.

Следует подчеркнуть, что на сегодняшний день отсутствует какая-либо экспериментальная информация (тем более в статистическом смысле), позволяющая решить уравнение и получить скорость изменения высоты плиты футеровки во

времени. Трудности такой процедуры очевидны: турбулентное движение твёрдого предельно-насыщенного потока, нелинейный характер взаимодействия футеровки и загрузки и т.д.

Тем не менее, изложенная теория позволяет в качественном смысле показать волновой характер разрушения футеровки.

Следуя Великанову, для анализа результатов будем исходить из физической природы безразмерных величин ε и ν .

Положительное значение ε соответствует случаю, когда средняя скорость меньше той, которая необходима для отрыва контртелом от футеровки фрагмента резины; т.е. отрыв фрагмента (при положительном ν) возможен лишь начиная с того момента, когда удовлетворяется неравенство

$$\bar{u} + u'_0 > u_{(0)} \text{ или } \nu \geq \varepsilon.$$

При отрицательном значении ε (когда $\bar{u} > u_{(0)}$) отрыв фрагмента резины происходит при средней скорости (даже при $\nu = 0$) и прекращается лишь при отрицательных значениях, удовлетворяя неравенство $\leq \varepsilon$.

Из графика (рис. 1) видно, что на отрезке от 0 до 1 происходит следующее изменение высоты футеровки: при $\varepsilon = +3$ и $\nu = 3$ имеет место интенсивный износ плиты, который в дальнейшем при приближении ξ к 1 затухает. Такое явление обусловлено тем, что влияние повышенной скорости в начальной точке затухает по длине и более вероятными оказываются меньшие скорости пульсаций, недостаточные для отрыва фрагмента резины от матрицы. В дальнейшем получаем отчётливую волну износа футеровки, что и наблюдается на практике [3].

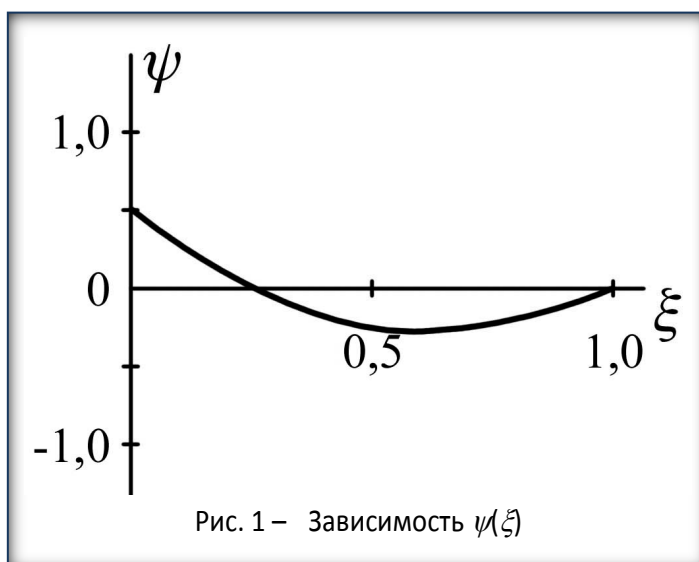
Именно благодаря турбулентности, в частности, пульсаций давлений и скоростей, поверхность даже совершенно плоской резиновой футеровки со временем превращается в волнообразную [2].

Таким образом, уравнение (6) позволяет описать природу волнового абразивно-усталостного износа резиновой футеровки.

Следует подчеркнуть, что эффект волнообразного износа футеровки характерен для всех видов футеровок («Плита-Волна», «Плита-Лифтёр-Волна», и т.д.) и практически для всех типов барабанных мельниц. Это подчёркивает общность динамических процессов, происходящих в барабанных мельницах, при дезинтеграции минерального сырья и открывает перспективы для создания оптимальных конструкций футеровки.

Рассмотрим некоторые приложения рассматриваемой теории к динамике барабанных мельниц.

Особенности разрушения резиновой футеровки. Процесс разрушения футеровки имеет пространственную форму и осуществляется во времени, от нескольких часов до нескольких лет. Сам процесс разрушения является частью более общего процесса – взаимодействия футеровки с технологиче-



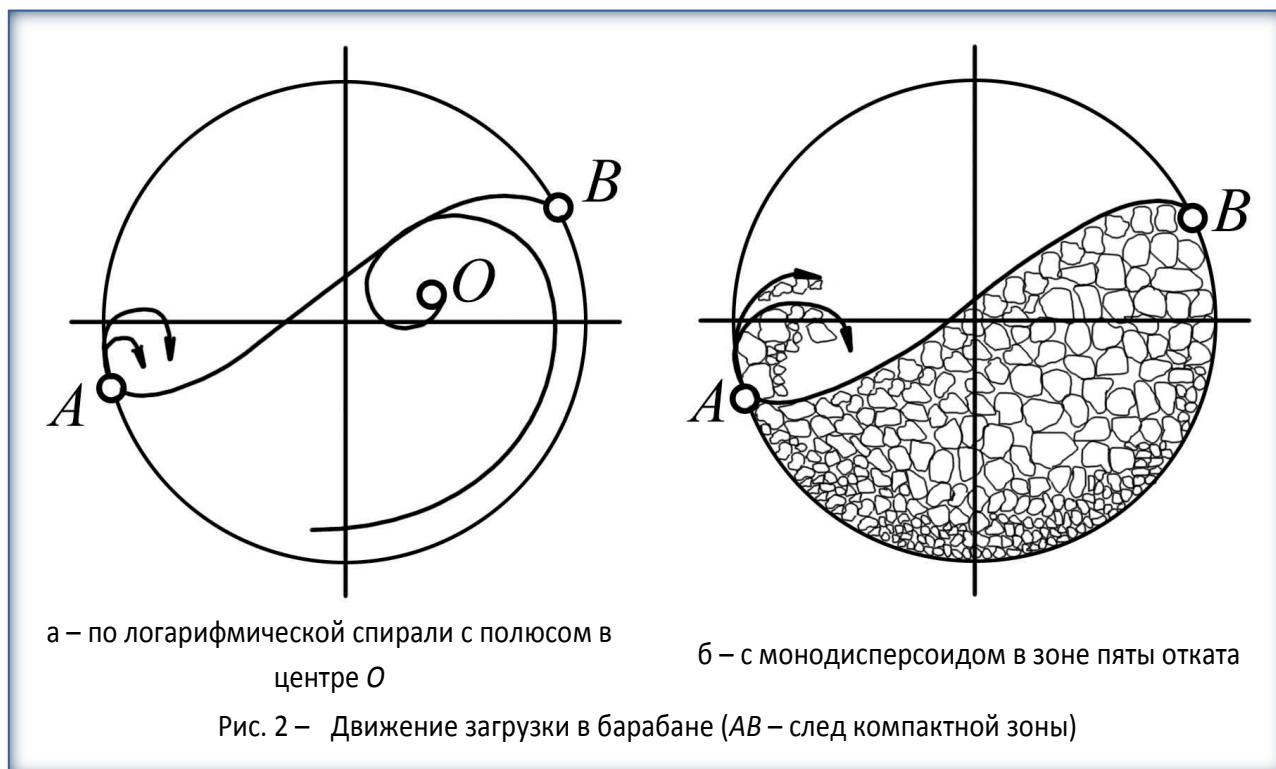
ской загрузкой, и поэтому является функцией многих переменных: геометрических размеров барабана, скорости его вращения, особенности перерабатываемого материала (абразивность, крупность куска, наличие твёрдого в пульпе и т.д.), геометрической формы резиновой футеровки, физико-механических характеристик резины и т.д. Поэтому разрушение можно считать процессом многовекторным, стохастическим и нелинейным. Изменение одного из параметров системы, например, диаметра барабана или скорости его вращения, может привести и к изменению характера разрушения футеровки. Имеется ещё одно весьма важное обстоятельство: в силу специфики работы мельниц моделирование происходящих в них процессов встречает ряд экспериментальных трудностей, иногда непреодолимых. Поэтому об этих процессах приходится судить косвенно, т.е. исследовать последствия их проявлений; например, о механизме износа судить по морфологии поверхности разрушения и степени износа элементов футеровки и т.д.

Как отмечалось в [2], основные процессы дезинтеграции технологической загрузки происходят в сегменте загрузки. Однако процессы, касающиеся непосредственно футеровки и, прежде всего, её долговечности и специфики разрушения, происходят непосредственно на границе фаз пульпа – поверхность футеровки.

Явление детерминированного хаоса. Известно, что движение внутримельничной загрузки в барабане мельницы обладает сложной иерархической структурой с турбулентным движением пульпы и вихреобразным пульсирующим движением загрузки; в целом процесс движения носит стохастический и нелинейный характер. Турбулентность как нерегулярное поведение нелинейной системы непосредственно связана с детерминированным многомерным хаосом и характеризуется сложным пространственно-временным поведением.

В механике под детерминированным хаосом понимают нерегулярное или хаотическое движение, вызванное нелинейностью среды, для которой динамические законы движения однозначно определяют эволюцию во времени состояния системы. В барабане мельницы будет наблюдаться сдвиговая турбулентность пульпы, особенно на разделе фаз пульпа-футеровка; при этом детерминированный хаос может возникать в локальных областях сегмента загрузки.

Таким образом, движение внутримельничной загрузки можно рассматривать как движение открытой системы, имеющей большие отклонения параметров от равновесного состояния, нелинейность основных характеристик и кооперативное поведение подсистем, т.е. поведение постоянно возникающих в сегменте новых пространственно-временных структур. Такие структуры будут возникать в результате влияния ряда взаимосвязанных между собой факторов: турбулентного движения пульпы; скольжения загрузки относительно футеровки и возникновения благодаря этому фрикционных колебаний; большой диссипации энергии сегмента загрузки; поворотной асимметрии движения барабана в результате несимметричного распределения загрузки и несовершенства конструкции и др. Форма структурных образований в объёме мельницы может иметь определённую закономерность в силу существования всеобщей формообразующей тенденции (более подробно рассматривается ниже), а их размеры будут изменяться по законам случайностей. Из всех вновь образованных структур более устойчивыми будут те, для ко-



торых будет соблюдаться принцип минимума диссипации. Следует подчеркнуть существенную роль диссипации в динамике внутримельничной загрузки: диссипация лежит в основе гидродинамических пульсаций загрузки и в основе механизма формообразования сегмента загрузки; часть диссипируемой энергии превращается в тепловую и нагревает загрузку, что уменьшает вязкость пульпы и тем самым изменяет коэффициент скольжения, и негативно сказывается на долговечности футеровки. Особенно следует отметить большую роль диссипации энергии во взаимодействии сегмента загрузки с резиновой футеровкой: взаимное приспособление потока и русла футеровки порождает определение гидроморфологических зависимостей, характеризующих как скоростное поле потока в локальных областях, так и морфометрические характеристики рельефа футеровки. Из всех возможных вариантов реализуются лишь те, при которых поток затрачивает наименьшее количество энергии, т.е. диссипация энергии системы должна быть минимальной.

Если рассматривать движение загрузки по логарифмической спирали, то след её наиболее чётко проявляется на границе раздела фаз пульпа-футеровка. Этот факт может служить весьма важным аргументом в пользу утверждения Д.К. Крюкова и его последователей, что износ рабочей поверхности металлической футеровки происходит именно по логарифмической спирали. Для резиновой футеровки, как это показано ранее, износ по логарифмической спирали является частным случаем.

Механика движения загрузки в зоне пяты отката имеет одну важную особенность, установленную экспериментально: на стыке загрузки и футеровки наблюдается мощное структурное образование, вызванное турбулентным движением пульпы (рис. 2, б). Согласно гидродинамике движения предельно-насыщенных потоков позади движущегося тела или компактной системы твёрдых частиц всегда образуется пространство с пониженным давлением; разность давлений и опреде-

ляет динамическое движение такой системы. К тому же сам турбулентный режим движения всегда сопровождается образованием вихрей позади тела.

Это структурное образование (ранее оно было названо монодисперсоидом), обладает нестабильностью формы и размеров, ему присуща неустойчивость движения. В объёме монодисперсоида находится пульпа, металлические шары и измельчаемый материал различной крупности; все это вместе благодаря турбулентности находится в псевдосжиженном (кипящем) состоянии. Квазиустойчивость формы и размеров монодисперсоида в течение определённого времени определяется скоростью движения барабана, степенью его заполнения, величиной скольжения загрузки относительно футеровки (коэффициентом трения), вязкостью пульпы и рельефом футеровки. Это структурное образование является одним из основных факторов разрушения резиновой футеровки, т.к. именно в его объёме металлические шары или крупные куски измельчаемого материала непосредственно соприкасаются с поверхностью футеровки; при этом сами шары имеют интенсивное хаотическое движение. Поэтому в зоне контакта наблюдаются различные виды нагружения резиновой футеровки: удар, вдавливание и абразивно-усталостный износ. Такое утверждение не противоречит исследованиям Д. Крюкова и П. Малярова.

Явление детерминированного хаоса вместе с другими эффектами (диссипация энергии системы, турбулентное движение пульпы, пульсационный характер движения барабана и др.) лежит в основе волнообразного движения внутримельничной загрузки и принципа локального разрушения элементов футеровки. В массивных резиновых элементах (плиты, лифтёры) с неоднородным полем напряжений накопление повреждений на поверхности и в объёме будет также неоднородным. Поэтому при прочих равных условиях (режим нагружения, внешняя среда и т.д.) место и время появления очагов разрушения носит вероятностный характер. В практике это выражается в виде неодинакового износа рядом расположенных плит или лифтёров, в различных морфометрических особенностях поверхности разрушения и различной долговечности до отказа.

Закономерность волнового движения внутримельничной загрузки в барабане. Согласно законам гидродинамики уже в силу одной турбулентности потока плоское русло футеровки превращается в волнообразное. Если рассматривать резиновую футеровку как гидродинамическую форму (рис. 3), то согласно теории Буссинеска для водослива с острым ребром максимум скоростей будет наблюдаться у самого ребра. В этом случае изотакхи (направляющие потока) будут идти от дна, и загигаться кверху; донная скорость уменьшается, а восходящее течение пульпы резко увеличивается. Максимальное значение донной скорости будет наблюдаться на валу переката, т.е. на торце лифтёра или плиты. Именно такое распределение скоростей и лежит в основе механизма абразивно-усталостного износа плит и лифтёров резиновой футеровки (см. рис. 3, рис. 4).

При этом морфометрический рельеф футеровки будет определяться, в том числе, и возникающей в потоке поперечной циркуляцией, вызванной центробежной силой. На этот важный факт, т.е. на то, что многие явления при движении потока связаны с интенсивностью перемешивания за счёт пульсации скоростей, а

именно это и наблюдается в барабане мельницы, было указано в ранних классических работах Буссинеска.

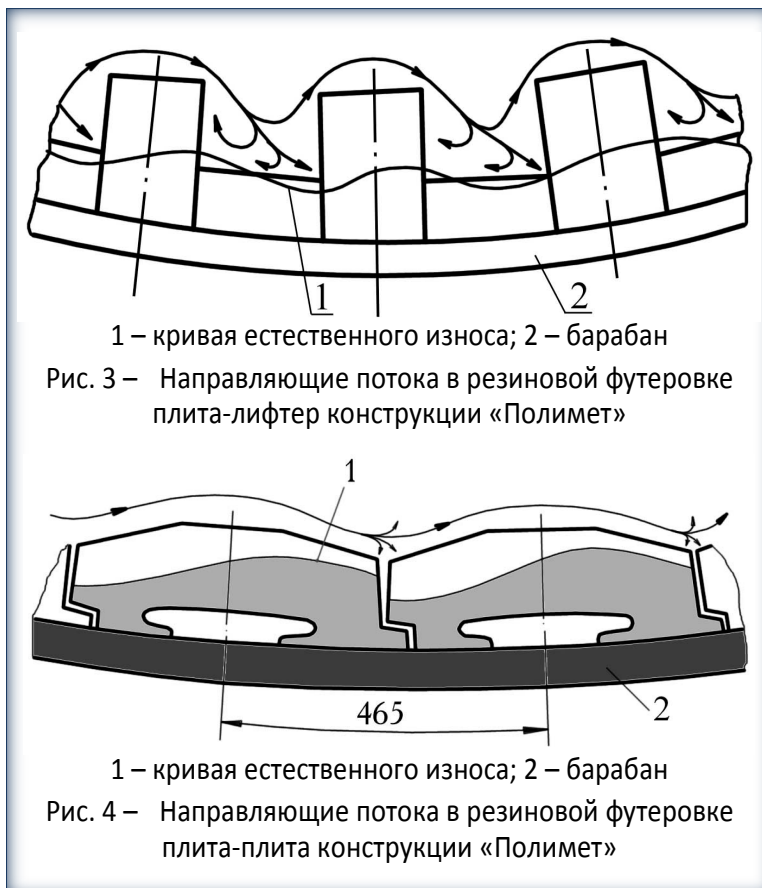
Длительные промышленные испытания мельниц с резиновой футеровкой показали, что между структурной формой турбулентности потока и морфометрическими особенностями рельефа футеровки существует теснейшая связь. Поток и футеровка находятся в определённом взаимодействии и представляют собой некоторое единство двух взаимоположенных сторон одного и того же явления, т.е., механическая сущность процесса движения загрузки может быть сведена к взаимодействию потока и футеровки:

поток управляет рельефом футеровки, а футеровка, в свою очередь, управляет потоком. Такое взаимодействие происходит в некотором пространственно-временном континууме: влияние рельефа футеровки непосредственно и очень быстро передаётся скоростному полю, геометрическим формам и размерам структурных образований потока. Обратное же влияние, т.е. влияние потока на формирование рельефа футеровки, осуществляется в течение сравнительно длительного периода времени, определяемого главным образом структурными особенностями потока и механическими характеристиками футеровки. К тому же, такое влияние не остаётся постоянным в течение длительного времени; благодаря износу в резиновой футеровке изменяется и рельеф и геометрические размеры, а, следовательно, будут изменяться и структурные особенности потока.

Таким образом, рельеф футеровки находится в определённой зависимости от структуры потока и является в известном смысле отпечатком структурных образований его турбулентности. Образующиеся при этом новые формы поверхности футеровки непосредственно связаны с пульсацией скоростей и с линейной корреляцией между мгновенными скоростями, определяющими масштаб этой турбулентности.

Такая взаимная приспособляемость потока и футеровки в реальных условиях происходит в течение некоторого времени, иногда нескольких сот часов. Именно в это время наблюдается снижение производительности мельниц; после установления определённого равновесия между футеровкой и потоком мельница выходит на оптимальный режим работы.

В конечном итоге появляются такие гидроморфологические характеристики потока и такой морфометрический рельеф футеровки, при которых поток на пре-



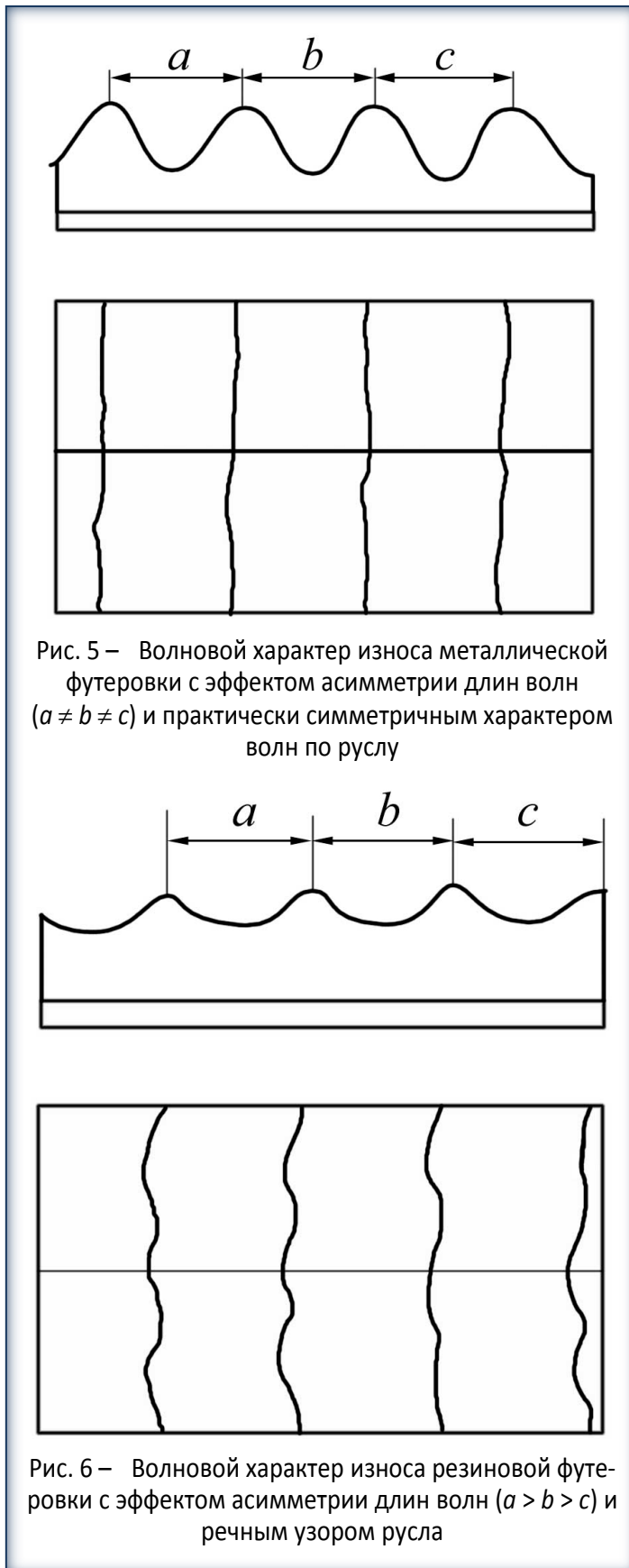
одоление всех сопротивлений затрачивает минимум энергии или минимум диссипации. Т.е. из всех возможных структурных образований потока реально осуществляются лишь те, для которых наблюдается минимальное рассеяние энергии. В установившемся движении мельницы наблюдается именно такое структурное образование потока, которое соответствует этому принципу (принцип Рэля-Гельмгольца).

Отсюда вытекает непосредственная задача для конструкторов: необходимо выбрать такую геометрическую форму резиновой футеровки, которая появляется с течением времени в результате достижения некоторого гармонического равновесия между потоком и рельефом футеровки.

Как видно, диссипация энергии играет существенную роль, как в формировании морфометрического рельефа футеровки, так и в формировании русла потока; она не только задаёт размеры и симметрию волн футеровки, но и формирует ритм речного узора. Рассмотрим примеры такого формирования для мельницы МШЦ 5,5×6,5.

В первом случае использовалась металлическая футеровка одноволнового типа с ребристой поверхностью. В процессе эксплуатации рабочая поверхность футеровки приобретала волновую форму (рис. 5); при этом наблюдалась чёткая асимметрия волн (расстояние между выступами соседних волн отличалось на 10 % и более) и практическое отсутствие речного узора.

Во втором случае использовалась резиновая футеровка «Плита-Волна» трапецевидной формы. В процессе эксплуатации рабочая поверхность футеровки приобретала волновую форму (рис. 6); при этом также наблюдалась некоторая асимметрия волн и речной узор



русла. Характерно, что асимметрия волн (с уменьшением расстояния между выступами примерно на 15 %) ритмично повторялась через 36° , т.е. примерно через каждые неполные четыре плиты футеровки. В принципе это свидетельствует, по крайней мере, о двух пульсациях потока: первая имела амплитуду порядка 12° и вторая – порядка 36° .

Как видно, металлическая футеровка взаимодействовала с потоком как упругое тело с незначительной диссипацией энергии; отсюда чёткая геометрическая симметрия волн (асимметрия наблюдалась только в различии длины между выступами волн) и практически отсутствие речного узора. Резиновая футеровка как вязкоупругая сильно диссипативная среда более гибко реагировала на турбулентный поток; отсюда не только асимметрия волн, но и определённый ритм речного узора. Все это подтверждает наличие эффекта гидроподушки на разделе фаз загрузка-футеровка с мощной турбулентностью потока, с вихреобразным спиралевидным движением пульпы. Несмотря на вероятностную природу возникновения и угасания пульсаций, появление и гибель структур, движение сегмента загрузки, тем не менее, подчиняется некоторой строгой закономерности, некоторой динамической асимметрии, проявляющейся в определённой формообразующей тенденции. Такая тенденция существует в пространственно-временном континууме и её проявление, безусловно, должно выражаться через некоторые универсальные постоянные. Параметры такого объёмно-пространственного процесса трудно определить экспериментально и они проявляются лишь в форме вторичных структурных образований, т.е. отпечатков на поверхности футеровки: волн, речного узора и других морфометрических особенностей.

Изложенная теория волнового абразивно-усталостного износа резины как упругонаследственной среды позволяет, по крайней мере в первом приближении, объяснить основные эффекты и морфометрические признаки разрушения футеровки: появление волн износа, их смещение во времени, асимметрию волн, речной узор износа и т.д.

В качестве примера можно провести характер износа резиновой футеровки типа «Плита-Волна» (рис. 6) на мельнице при дезинтеграции минерального сырья. Исследования показали, что футеровка уже с первых часов стала приобретать волновой характер: наблюдалась асимметрия волн и их смещение во времени. Эти эффекты, как показано выше, связаны со сложным механизмом абразивно-усталостного износа резины. А колебательное движение загрузки в сочетании с турбулентным характером движения предельно-насыщенного двухфазного потока существенно усложняет общий характер взаимодействия загрузки с футеровкой и затрудняет построение адекватной математической модели.

На взгляд автора это подтверждает ранее высказанное мнение [2], что для расчёта резиновых футеровок необходима некоторая интегральная оценка. В качестве такой оценки была предложена энергия абразивно-усталостного износа, определяемая при прямых экспериментальных исследованиях. Практика подтвердила правильность такой концепции; создание конструкции резиновых футеровок типа «Волна» с учётом разработанной теории подтвердила свою конкурентоспособность на мировом рынке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Великанов, М.А. Динамика русловых потоков / М.А. Великанов. – Л.: Гидромет. издательство, 1949. – 474 с.
2. Дырда, В.И. Резиновые футеровки технологических машин / В.И. Дырда, Р.П. Зозуля. – Днепропетровск: Журфонд, 2013. – 236 с.
3. Дырда, В.И. Динамическая модель волнового абразивно-усталостного разрушения резиновой футеровки в барабанных мельницах / В.И. Дырда, В.А. Калашников, С.Л. Евенко [и др.] // Геотехническая механика. – 2012. – Вып. 106. – С. 15-24.

REFERENCES

1. Velikanov, M.A. (1949), *Dinamika ruslovykh potokov* [Dynamics of channel flow], Gidromet. izdatelstvo, Leningrad, USSR.
2. Dyrda, V.I. and Zozulya, R.P. (2013), *Rezinovye futerovki tekhnologicheskikh mashin* [Rubber Lining of Technological Machines], Zhurfond, Dnepropetrovsk, Ukraine.
3. Dyrda, V.I., Kalashnikov, V.A. and Evenko, S.L. (2012), "Dynamic model of wave abrasive fatigue failure of the rubber lining in rattlers", *Geo-technical mechanics*, no. 106, pp. 15-24.

Об авторе

Дырда Виталий Илларионович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, vita.igtm@mail.ru

About the author

Dyrda Vitaly Illarionovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Head of Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, vita.igtm@mail.ru