

# РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЭРОЗИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ\*

Н.И. Смирнов, А.Н. Яговкина, М.В. Прожега, Н.Н. Смирнов

*В работе описаны стенд центробежного типа и методика испытаний материалов на эрозионное изнашивание в модельной среде, содержащей воду, абразивные частицы, коррозионно-активные элементы, являющейся аналогом пластовой жидкости нефтяных скважин. Представлены результаты испытаний в воде с абразивом четырех типов порошковых материалов на основе железа и меди, легированных Ni, Cr, Mo. Параметры опыта: скорость струи жидкости 11–16 м/с, угол атаки 45°, 90°, кварцевые и корундовые частицы различной дисперсности F100, F40, F24. Выявлена линейная зависимость интенсивности изнашивания от времени опыта при различных углах атаки. Износ порошковых материалов в воде с корундом F100 примерно в 5 раз больше, чем с кварцем схожей фракции. При воздействии мелких частиц F100 наибольшую износостойкость имеет материал ПК90Н4МГ2КД15.*

**Ключевые слова:** эрозионное изнашивание, центробежный ускоритель, порошковые материалы, износостойкость.

## DEVELOPMENT OF METHODS FOR MATERIALS EROSION TESTS

N.I. Smirnov, A.N. Yagovkina, M.V. Prozhega, N.N. Smirnov

*In the paper there are described the test bench of centrifugal type and test methodology for erosive wear of materials in model medium, which is an analog to formation fluid of oil well and containing water, abrasive particles, corrosive elements, is described. The test results for eight types of powder materials on the basis of iron and copper, alloyed by Ni, Cr, Mo and having ferrite-pearlite, pearlite or ferrite structure, in water with abrasive are presents. The parameters of experiment are: fluid jet velocity 11–16 m/s; attack angle 45°, 90°; quartz and corundum particles of various dispersion F100, F40, F24 used as abrasive. The linear dependence of wear intensity on test time at various attack angles is revealed. Wear of powder materials in water by corundum particles of F100 size approximately five times higher, than with use of quartz particles of the same size. The "ПК90Н4МГ2КД15" material has maximum wear resistance at action of small particles of F100 size.*

**Keywords:** erosive wear, centrifugal accelerator, powder materials, wear resistance.

### Введение

Эрозионно-коррозионное повреждение деталей часто встречается в нефтедобывающем оборудовании, в пульпопроводах, шахтных насосах, гидротурбинах, других типах машиностроительных установок, что приводит к большим экономическим потерям при их отказе и ремонте.

В установках электрических центробежных насосов для добычи нефти (УЭЦН) эрозионный износ проявляется в виде «промылов» проточной части рабочих органов (РО) насоса, газосепаратора (рис. 1).

При изготовлении РО широко применяются порошковые материалы. Однако их эрозионная износостойкость не регламентируется кон-

\* Работа выполнена в рамках госзадания по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук (пункт № 29 «Триботехника и износостойкость высоконагруженных элементов машин»), госрегистрация № 01201356317).



Рис. 1. Эрозионный износ в УЭЦН:

а – направляющий аппарат; б – шнек газосепаратора (штриховая линия – исходная форма)

структорско-технологической документацией, и отсутствуют методики соответствующих испытаний.

Исследованию эрозионных процессов посвящены работы многих авторов. Фундаментальный обзор по методикам и расчетным моделям дан в статье [1]. Модели эрозионного износа пластичных и хрупких материалов были изложены в работах [2–4]. В работе [5] на основе вычислительной гидродинамики рассмотрены механистические модели для прогнозирования эрозионного износа трубопроводов. На основе физических моделей созданы стенды для определения износостойкости материалов, экспериментальной оценки скорости эрозии и исследования влияния на нее различных факторов.

Стенды отличаются по способу ускорения частиц абразива к поверхности образца: за счет давления рабочей среды (газовой струи) [6] или центробежного ускорителя [7]. В качестве рабочей среды используются как газовые среды, так и жидкости или суспензии. Стенды с использованием газовой струи, как правило, однопозиционные (один образец), стенды с использованием жидкости преимущественно многопозиционные. В различных типах стендов приходится решать ряд технических проблем. Например, в работе [8] представлен разработанный центробежный ускоритель с восемью образцами, одновременно устанавливаемыми под различными углами. Однако циркулирование одной и той же смеси по замкнутому контуру в течение опыта приводит к потере частицами абразива своих режущих свойств, износу вспомогательного насоса и снижению точности эксперимента. Аналогичные проблемы могут возникать в методике испытаний при скользящем падении струи жидкости с абразивными части-

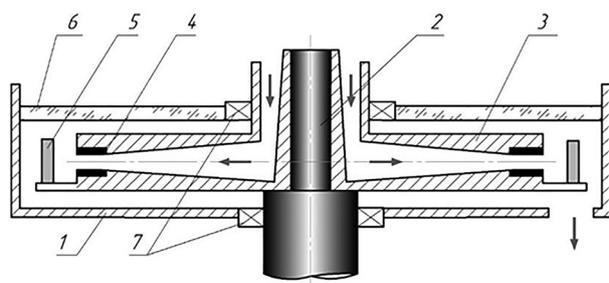
цами на образцы [9]. Большинство известных устройств предназначено для проведения испытаний на эрозионный износ преимущественно в абразивосодержащей среде.

Целью данной работы является разработка стенда на эрозионное изнашивание, методики испытаний, а также проведение опытов с порошковыми материалами в абразивосодержащей среде.

#### Описание стенда для испытаний на износ

На основе изучения мирового опыта в ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова был разработан стенд для испытаний материалов на эрозионное изнашивание в абразивосодержащей и коррозионно-активной среде [10], отличающийся рядом преимуществ. Особенностью испытательного стенда является однократное использование абразива. Это достигается путем отделения абразива от жидкости в гравитационном сепараторе. Таким образом, вспомогательный насос, перекачивающий жидкость, не подвергается износу. Используемые материалы стенда и аппаратура допускают проведение опытов с коррозионно-активной жидкостью при температуре до 80 °С.

Установка выполнена по принципу центробежного ускорителя с замкнутым контуром движения жидкости и состоит из станины с испытательной камерой, электродвигателя с регулируемой частотой вращения, контейнера для абразива, дозатора абразива, смесителя, ротора, вспомогательного насоса, гравитационного сепаратора, расходомера, системы измерения и управления. До начала каждого испытания бак сепаратора заполняют рабочей средой. С помощью вспомогательного насоса для хи-



**Рис. 2. Схема испытательной камеры (стрелки показывают направление движения жидкости с абразивом):**

1 – испытательная камера; 2 – вал; 3 – ротор;  
4 – сопло; 5 – образец; 6 – крышка; 7 – уплотнения

мических сред жидкость подается в смеситель, где смешивается с абразивом. Скорость струи жидкости у образца определяют опосредованно через измерение расхода с помощью расходомера.

В испытательной камере 1 (рис. 2) находится вращающийся вал 2, на котором установлен ротор 3 с двумя (или четырьмя) каналами и износостойкими соплами 4. Образцы 5 закрепляются в корпусах из фторопласта на роторе напротив сопел под разными углами к струе жидкости. Камера закрывается прозрачной крышкой 6. Уплотнения 7 предотвращают протекание жидкости в местах контакта с вращающимся ротором. При вращении ротора жидкость, поступающая из смесителя, под действием центробежных сил ускоряется в каналах ротора и через сопла попадает под определенным углом на образцы, производя эрозионное разрушение их поверхности. Затем жидкость вытекает из камеры по трубе в гравитационный сепаратор, где происходит осаждение абразивных частиц.

Расстояние от образца до сопла может изменяться, угол установки образцов  $\alpha$  относительно потока (угол между поверхностью образца и осью сопла) регулируется от  $30^\circ$  до  $90^\circ$ . Одновременно устанавливаются два (или четыре) образца под определенным углом и на определенном расстоянии от сопла. Дозатор абразива позволяет регулировать подачу твердых частиц в смеситель, за счет чего достигается изменение концентрации частиц в модельной жидкости. При проведении эксперимента частота вращения ротора и скорость струи жидкости у каждого образца остаются постоянными.

После опыта образцы взвешивают и определяют изменение массы. В качестве критерия износостойкости материалов при эрозионном изнашивании приняли интенсивность изнашивания [4]:

$$I_3 = \frac{\Delta m}{M_a}, \quad (1)$$

где  $I_3$  – интенсивность изнашивания, г/г;  $\Delta m$  – изменение массы образца, г;  $M_a$  – масса абразива в опыте, г.

Стенд позволяет исследовать влияние различных факторов на эрозионный износ материалов: концентрация абразива, форма частиц, скорость и температура жидкости, свойства жидкости, угол установки образцов, свойства материала образца и др.

### Параметры опыта

В качестве модельной среды использовали воду с абразивом. Концентрация твердых частиц варьировалась от 0,6 до 1,1 г/л, частоту вращения ротора изменяли от 950 до 1500 об/мин, расход жидкости – от 1 до 1,5 м<sup>3</sup>/ч. Испытания проводили при двух значениях угла установки образца  $\alpha = 45^\circ$  и  $\alpha = 90^\circ$ , величине скорости струи жидкости у образца 11 и 16 м/с и при комнатной температуре. Количество повторений опытов при одинаковых условиях – не менее трех.

Одной из целей работы является выбор времени опыта при испытаниях порошковых материалов. При большой длительности эксперимента растут материальные затраты на абразивные материалы, электроэнергию. При коротком времени опыта значимые величины износа можно получить путем увеличения концентрации абразива. Однако при этом возможны искажение результатов за счет соударения частиц друг с другом и большой износ оборудования. Также важным при проведении опыта является условие неизменности механизма изнашивания образцов. Если, например, в процессе опыта микрорезание на каком-то этапе перейдет в усталостное разрушение, то при испытании материалов с отличающимися свойствами соотношение их интенсивностей изнашивания может измениться. По этой причине сравнение износостойкости этих материалов будет некорректным.

Химический состав порошковых сталей и их микротвердость

№ материала	Марка материала	Массовая доля элементов, %							Микротвердость, HV <sub>100</sub>
		C	Cu	Cr	Ni	Mo	S	Mn	
1	ПК70Д15	0,61–0,9	13–17	–	–	–	–	–	344±31
2	ПК90Н4МГ2КД15	0,81–1,2	13–17	–	3–5	0,3–0,7	0,15–0,45	1–3	505±59
3	ПК10Х16Н9Д20	не более 0,3	18–22	15–17	8–10	–	–	–	270±15
4	ПК10Х7Н4Д20	не более 0,3	18–22	6–8	3–5	–	–	–	410±32

### Свойства материалов образцов и абразива

Образцы для испытаний на износ были изготовлены компанией «Керамет» в виде прямоугольных пластинок размером 25×15×3 мм из четырех видов порошковых материалов на основе железа (табл. 1). Заготовки получены методом порошковой металлургии: прессование смеси порошков и спекание в атмосфере диссоциированного аммиака с одновременной инфильтрацией медью. Шероховатость образцов (Ra) – 0,14 мкм. В таблице 1 представлены результаты измерения микротвердости материалов.

Микротвердость исследуемых материалов определяли с помощью микротвердомера ПМТ–3 при нагрузке 100 г. Образцы запрессо-

вывали в токопроводящую эпоксидную смолу *Polyfast* при 180 °С на специализированном горячем прессе *CitoPress*. Приготовление шлифов проводили на установке *Struers Rotopol 21*. При шлифовке использовали бумажные круги из карбида кремния, полировка поверхности производилась при помощи паст с алмазным порошком и оксидной суспензии OP-S на основе SiO<sub>2</sub>.

Микроструктуру поверхности образца изучали на сканирующем электронном микроскопе *Hitachi S-3400N* при различных увеличениях от ×100 до ×1000 при ускоряющем напряжении 15 кВ. Микроскоп оснащен рентгеновским энергодисперсионным спектрометром *NORAN* для проведения локального микроанализа.

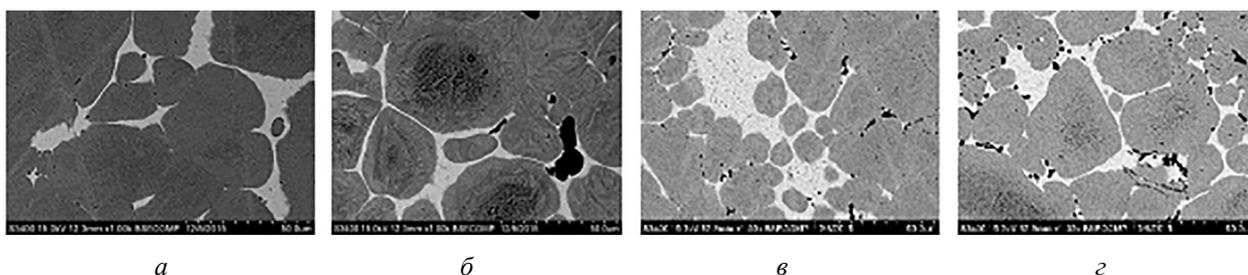


Рис. 3. Структура порошковых сталей:

а – ПК70Д15; б – ПК90Н4МГ2КД15; в – ПК10Х16Н9Д20; г – ПК10Х7Н4Д20

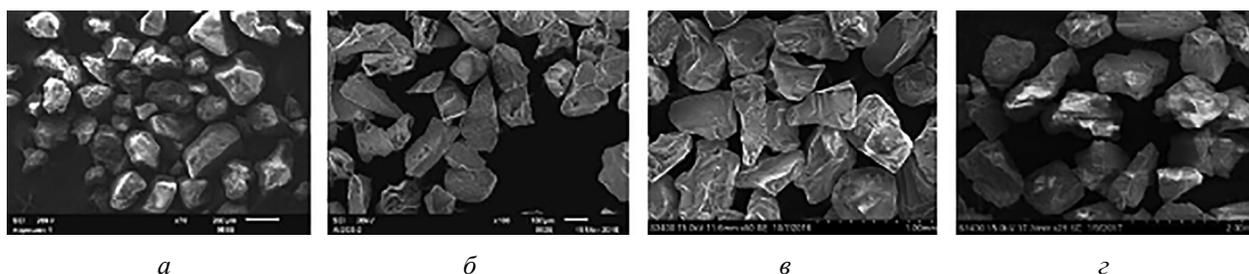


Рис. 4. Форма абразивных зерен:

а – кварц; б – корунд F100; в – корунд F40, г – корунд F24

Изменение массы образцов измеряли на весах «Ohaus» *Advanturer Pro* с погрешностью измерений  $\delta = 0,0001$  г. При помощи профилометра модели 202 (Калибр, Россия) определяли профиль области износа.

Исследуемые порошковые стали имеют либо феррито-перлитную структуру (рис. 3, а, в, г), либо перлитную (см. рис. 3, б), с включениями меди и легированием в зависимости от состава Ni, Cr, Mo и другими элементами.

Гранулометрический состав и средний размер частиц абразива измеряли при помощи микроанализатора *Analysette 22 MicroTec Plus* компании *FRITSCH* по дифракции лазерного луча, сканирующего взвесь анализируемого порошка в воде.

Абразив представляет собой частички кварцевого песка или корунда различной дисперсности (рис. 4). Форма частиц кварца округлая, корунда – остроугольная. Кварц такой формы

и размера встречается в пластовой жидкости нефтяных скважин. Корунд используется многими исследователями и обладает хорошими изнашивающими свойствами.

Гранулометрический состав порошка кварца включает 10 % мелкой фракции с размером частиц до 100 мкм, около 80 % – частицы размером от 100 до 280 мкм, остальные 10 % представлены более крупной фракцией – до 420 мкм. Такая же тенденция наблюдается у порошков мелкого корунда марки F100. Основная фракция порошка (83 %) имеет размер от 100 до 280 мкм. Средний размер частиц кварца и корунда F100 – 180 мкм. Порошок корунда F40 состоит из двух фракций 320–580 мкм и 580–880 мкм, количество которых отличается незначительно. Средний размер частиц равен 530 мкм. Размер частиц корунда F24 находится в диапазоне от 600 мкм до 1,1 мм.

Таблица 2

Результаты опытов по кинетике износа

Номер опыта	Продолжительность опыта, мин	$I, \cdot 10^6, \text{ г/г}$	
		$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 90^\circ$
1	160	2,13	2,27
2	160	1,93	1,93
3	160	2,13	2,00
4	160	2,26	2,26

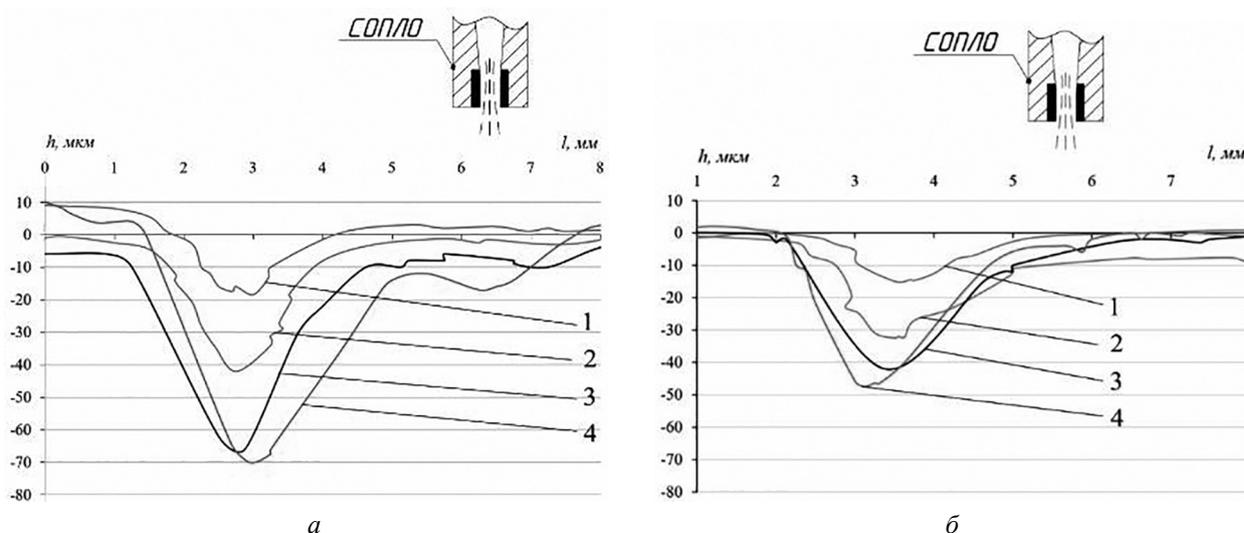


Рис. 5. Изменение продольного профиля износа образца (кварц, средний размер частиц  $D_{cp} = 180$  мкм) при  $\alpha = 90^\circ$  (а) и  $\alpha = 45^\circ$  (б):

$h$  – величина износа;  $l$  – длина профиля износа (цифры 1, 2, 3, 4 соответствуют номерам опыта из табл. 2)

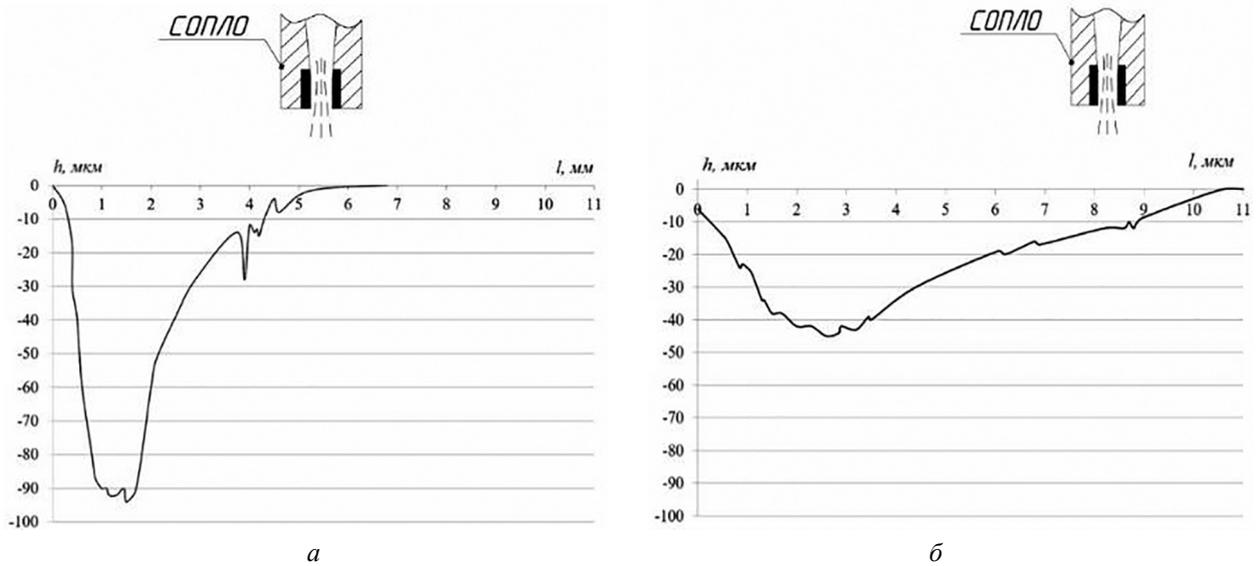


Рис. 6. Продольный профиль изношенной поверхности после воздействия корунда F100 ( $D_{cp} = 180$  мкм) при  $\alpha = 90^\circ$  (а) и  $\alpha = 45^\circ$  (б)

**Анализ результатов исследований**

Для отработки методики исследовали кинетику изнашивания, на основании которой выбирали время опыта. Проводили испытания образца из материала ПК70Д15 в воде с кварцем при скорости струи 16 м/с и угле установки образцов  $45^\circ$  и  $90^\circ$ . После каждого опыта продолжительностью 160 мин образец взвешивали, записывали профилограммы области износа, определяли интенсивность изнашивания и устанавливали вновь аналогичным образом. Результаты опытов показали, что кинетика износа имеет линейный характер, т.е. при увеличении продолжительности опыта величина интенсивности изнашивания  $I_3$  практически не изменяется (табл. 2). При такой продолжительности

опыта можно получить значимые величины износов как для наименее износостойких, так и для более износостойких с приемлемыми разбросами измеряемых величин.

Среднее значение интенсивности изнашивания при заданных условиях составляет  $2,11 \cdot 10^{-6}$  г/г, разброс результатов в пределах 7 %.

Профилометрирование изношенной поверхности показало, что профиль износа зависит от угла установки образца  $\alpha$ . В обоих случаях, при  $\alpha = 90^\circ$  и  $\alpha = 45^\circ$ , износ неравномерный. Максимальная глубина изношенной поверхности в первом случае (рис. 5, а) в 1,5 раза больше, чем при  $\alpha = 45^\circ$  (рис. 5, б). Похожее соотношение наблюдается и при использовании корунда той же фракции (рис. 6). Следует

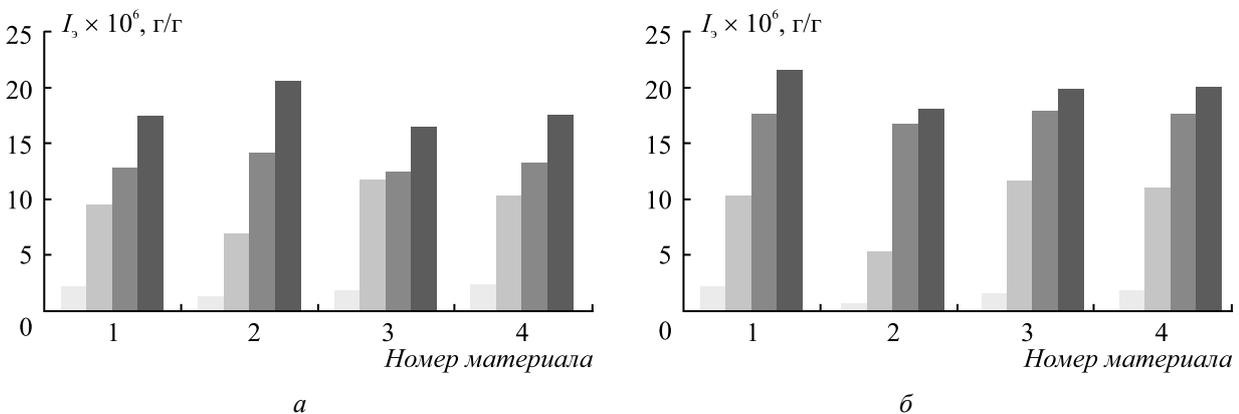


Рис. 7. Интенсивность изнашивания исследуемых материалов при скорости струи 16 м/с,  $\alpha = 90^\circ$  (а) и  $\alpha = 45^\circ$  (б):

■ – кварц ( $D_{cp} = 180$  мкм); ■ – корунд F100 ( $D_{cp} = 180$  мкм); ■ – корунд F40 ( $D_{cp} = 530$  мкм); ■ – корунд F24 ( $D_{cp} = 900$  мкм)

заметить, что интенсивность изнашивания в этих случаях приблизительно одинаковая.

Область максимального износа образца смещена относительно центра сопла за счет отклонения потока в центробежном ускорителе при вращении ротора. На рисунках 5 и 6 схематично показано местоположение сопла относительно области износа поверхности образца.

На рисунке 7 представлены результаты испытаний четырех типов порошковых материалов по разработанной методике. Выявлено, что тип абразива сильно влияет на износостойкость материалов. Интенсивность изнашивания  $I_s$  образцов при испытаниях в воде с корундом F100 примерно в 5 раз больше (в зависимости от угла  $\alpha$ ), чем в воде с кварцевым песком схожей фракции.

Интенсивность изнашивания порошковых материалов увеличивается при увеличении размера абразива. Наибольший износ наблюдается при испытаниях с корундом F24, средний размер частиц которого составляет  $D_{cp} = 900$  мкм. Например, для материала № 1 (ПК70Д15) интенсивность изнашивания при испытаниях с абразивом F24 в 1,4 раза выше, чем при испытаниях с абразивом F40 ( $D_{cp} = 530$  мкм), и выше в 1,8 раза по отношению к результатам при испытаниях с абразивом F100 ( $D_{cp} = 180$  мкм).

Как показали результаты испытаний, разница в износостойкости образца № 2 (ПК90Н-4МГ2КД15), имеющего наибольшую твердость среди испытываемых материалов (см. табл. 1), заметна лишь при воздействии мелких абразивных частиц размерностью F100. При воздействии крупных частиц размерностью F40 и F24 разница уменьшается и находится в пределах разброса измеряемых величин.

Вместе с тем, становится заметной разница в интенсивности изнашивания, связанная с углом установки образцов. При воздействии крупных частиц, F40 и F24, интенсивность изнашивания несколько меньше при угле установки образцов  $90^\circ$ .

### Выводы

На основе полученных результатов можно сделать следующие основные выводы.

Наиболее значимым параметром, влияющим на эрозионную износостойкость порошковых

материалов, при заданной скорости струи является тип абразива. Износ порошковых материалов в воде с корундом F100 ~ в 5 раз больше, чем с кварцем схожей фракции.

Размер абразива также влияет на интенсивность изнашивания порошковых материалов. С увеличением размера корунда с F100 до F24 интенсивность изнашивания материала ПК70Д15 увеличилась в 1,8 раза.

Твердость исследуемых порошковых материалов слабо влияет на их эрозионную износостойкость в заданных условиях. Материал ПК90Н4МГ2КД15 имеет наибольшую износостойкость в условиях воздействия абразивных частиц размерностью F100.

При проведении испытаний на эрозионное изнашивание необходимо учитывать неравномерность износа поверхности образца.

### Заключение

Эрозионно-коррозионные повреждения установок электрических центробежных насосов приводят к большим экономическим потерям при ремонте оборудования, а механизм таких повреждений недостаточно изучен. Разработана методика эрозионных испытаний на основе стенда центробежного типа, которая позволяет исследовать особенности износа и ранжировать материалы по износостойкости. Результаты проведенных испытаний порошковых материалов с разным содержанием никеля, хрома и молибдена можно использовать при проектировании и изготовлении насосных ступеней, обеспечивая необходимый ресурс и экономию средств. Дальнейшее направление совершенствования методики испытаний – разработка методики испытаний в коррозионной, абразивосодержащей среде.

### Список литературы

1. Meng H.C., Ludema K.C. Wear models and predictive equations: their form and content // Wear. 1995. Vol. 181–183. P. 443–457.
2. Finnie I. Some observations on the erosion of ductile metals // Wear. 1972. Vol. 19. P. 81–89.
3. Hutchings I.M. A model for the erosion of metals by spherical particles at normal incidence // Wear. 1981. Vol. 70. P. 269–281.
4. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбаров В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

5. *Козырев С.П.* Гидроабразивный износ металлов при кавитации. М.: Машиностроение, 1971. – 240 с.
6. *Yang K., Rong J., Liu C. et al.* Study on erosion–wear behavior and mechanism of plasma-sprayed alumina-based coatings by a novel slurry injection method // *Tribology International*. 2016. Vol. 93. P. 29–35.
7. Erosion classification of materials using a centrifugal erosion tester / *S. Söderberg, S. Hogmark, U. Engman, H. Swahn* // *Tribology International*. 1981. Vol. 14 (b). P. 333–343.
8. *Azimian M., Bart H.J.* Erosion investigations by means of a centrifugal accelerator erosion tester // *Wear*. 2015. Vol. 328–329. P. 249–256.
9. *Santa J.F., Baena J.C., Toro A.* Slurry erosion of thermal spray coatings and stainless steels for hydraulic machinery // *Wear*. 2007. Vol. 263. P. 258–264.
10. Пат. 2444719 Российская Федерация, МПК G 01 N 3/56. Способ испытания материалов на гидроабразивный и коррозионный износ / Н.И. Смирнов, Н.Н. Смирнов; опубл. 10.02.2012. Бюл. № 7.

Материал поступил в редакцию 30.03.2017

<p><b>СМИРНОВ Николай Иванович</b></p> <p>E-mail: <a href="mailto:smir1947@yandex.ru">smir1947@yandex.ru</a> Тел.: (499) 135-84-71</p>	<p>Кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Узлы трения для экстремальных условий» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники. Область научных интересов – ресурс и надежность машин, трибология. Автор 50 статей и 7 патентов.</p>
<p><b>ЯГОВКИНА Анна Николаевна</b></p> <p>E-mail: <a href="mailto:annyagovkina1@gmail.com">annyagovkina1@gmail.com</a> Тел.: (499) 135-84-71</p>	<p>Инженер лаборатории «Динамика трибологических процессов» Федерального государственного бюджетного учреждения науки ИМАШ РАН. Область научных интересов – порошковая металлургия, материаловедение, трибология. Автор 5 публикаций.</p>
<p><b>ПРОЖЕГА Максим Васильевич</b></p> <p>E-mail: <a href="mailto:prmaksim@gmail.com">prmaksim@gmail.com</a> Тел.: (499) 135-84-71</p>	<p>Кандидат технических наук, заведующий лабораторией «Динамика трибологических процессов» ИМАШ РАН. Область научных интересов – трибология. Автор 19 статей и 3 патентов.</p>
<p><b>СМИРНОВ Николай Николаевич</b></p> <p>E-mail: <a href="mailto:trenie12@yandex.ru">trenie12@yandex.ru</a> Тел.: (499) 135-84-71</p>	<p>Научный сотрудник лаборатории «Узлы трения для экстремальных условий» ИМАШ РАН, Лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники. Область научных интересов – надежность машин, трибология. Автор 23 статей и 4 патентов.</p>