

УДК 621.926

А. М. Кургузиков, канд. техн. наук, доц., Н. В. Волков, К. В. Новосельцев

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНЫХ МЕЖВИТКОВЫХ УСИЛИЙ ПРУЖИННЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

В статье рассмотрены вопросы теоретического и экспериментального способов определения контактных межвитковых усилий в аппаратах для измельчения и активации различных материалов с пружинными рабочими органами при сухом и мокром способах измельчения; предложено устройство для осуществления данного способа, что позволит в дальнейшем существенно экономить время и ресурсы в процессе эксплуатации и ремонта аппаратов, а также исключить неэффективное использование пружинных рабочих органов.

Эффективность процесса измельчения зависит от множества факторов. К ним можно отнести физико-механические свойства обрабатываемых материалов, геометрические параметры рабочего органа и свойства материала, из которого он изготовлен, режимы обработки материала.

Повышению эффективности измельчения, наряду с совмещением его с классификацией и проведением процесса в несколько стадий, способствует рациональный выбор удельных энергетических затрат, механических усилий и частот их воздействия на материал. Значительное влияние оказывает выбор мельницы и способа измельчения материалов [1].

Выбор мельницы представляет собой сложную задачу, при решении которой приходится принимать во внимание большое количество факторов различного порядка. К ним можно отнести физические (изменение свойства вещества при измельчении, техническая характеристика мельницы), химические, технологические, экономические (стоимость измельчения 1 т вещества при его переработке в различных измельчающих мельницах, экономический эффект измельчения) и другие.

Пружинные мельницы широко рекомендовали себя в области тонкого измельчения. Они позволяют производить обработку материала как сухим, так и мокрым способами. В настоящее время мельницы данного типа не могут обес-

печить крупнотоннажное производство тонкодисперсных материалов, однако получаемые порошки обладают совершенно новыми, ранее не известными свойствами для широкого круга измельчаемых материалов. Конструкция мельниц позволяет надежно герметизировать камеру измельчения во время процесса измельчения и обеспечивает свободный доступ для очистки при измельчении дорогостоящих, особо прочных и чистых материалов, производя минимальное «загрязнение» порошков материалами мельющей фурнитуры.

Интенсивность измельчения в любом аппарате зависит от природы вещества, от способа воздействия на измельчаемый материал (знакопеременная нагрузка, удар, трение), частоты и скорости приложения сил, а также от среды, в которой происходит измельчение: смачивающие жидкости способствуют измельчению, но не способствуют накоплению энергии в зонах остаточных напряжений.

При сухом измельчении, по мере возрастания дисперсности порошка, дробящий эффект становится все менее ощутимым, так как образующиеся тонкие частицы защищают крупные от воздействия. При достижении определенной дисперсности происходят процессы агрегации и конгломерации. К тому же помольный агрегат разогревается, так как при смыкании трещин на частицах поверхностная энергия и работа от трения загрузки переходит в тепло. Перед сухим

помолом целесообразно порошок просушивать, поскольку влага в небольшом количестве способствует указанным выше процессам.

При мокром измельчении жидкость оказывает расклинивающее действие в дефектах кристаллов и препятствует слипанию трещин. Этому способствуют и капиллярные силы. При мокром измельчении преобладает эффект истирания частиц, не требуется большое разрушающее усилие, а нужна большая поверхность воздействия. Достоинством мокрого измельчения является лучшее распределение частиц по размерам [2].

Разрушение материала в пружинных мельницах происходит за счет истирания и комплексного воздействия в нескольких плоскостях с высокочастотным нагружением сжатия обрабатываемого материала в межвитковом зазоре пружинного рабочего органа. Образование полостей поверхности сопровождается излучением энергии в пространство и аккумуляцией энергии как в поверхностном слое, так и внутри частиц вследствие изменения кристаллического строения. В результате измельчения материала в нем происходят изменения кристаллического строения с переходом в другую модификацию [3, 4].

Качество получаемого продукта зависит от величины контактного межвиткового усилия. Величину этого усилия необходимо определять для правильного выбора конструктивных параметров мельницы. Контактное усилие возникает при перемещении частицы, захваченной в межвитковое пространство со стороны зоны раскрытия пружины в зону сжатия. Возникает вопрос о степени влияния среды, в которой происходит измельчение, и как меняется методика определения истинного значения контактного усилия и напряжения, возникающего в зоне разрушения частиц материала.

Проектирование пружинных рабочих органов и аппаратов на их основе под соответствующие условия измельчения конкретного материала в первую очередь основано на расчетных данных

контактного межвиткового усилия обжатия, необходимого для разрушения частицы в расчетном положении с начала и в течение всего периода эксплуатации проектируемого устройства. Изменяющаяся характеристика и условия проведения процесса измельчения в мельницах с пружинным рабочим органом должна учитываться проектом с возможностью определять, контролировать, регулировать и принимать решение о замене изношенного пружинного рабочего органа в зависимости от значения контактного межвиткового усилия обжатия частицы материала при различных способах измельчения.

Адекватность математической модели процесса измельчения в аппаратах с пружинными рабочими органами в ранее проведенных исследованиях доказана неоднократно, что позволяет продвинуться в изучении влияния различных сред на качество получаемого продукта. Разбежка теоретических результатов с экспериментальными незначительна и составляет всего 8–10 %.

Величину контактного межвиткового усилия частиц размалываемого материала необходимо уметь определять для правильного выбора конструктивных параметров мельниц. Контактное межвитковое усилие обжатия возникает при перемещении частицы известного диаметра  $\delta$ , захваченной в межвитковое пространство со стороны растянутой части пружины, в зону сжатия. Считая частицу абсолютно жесткой, можно считать контактное межвитковое усилие равным усилию, необходимому для того, чтобы раздвинуть сжатые витки на величину, равную диаметру частицы.

Согласно методике, изложенной в [5], для определения контактного межвиткового усилия  $P_k$  воспользуемся интегралом Мора. Отметим, что сдвиговая сила  $Q$  вызывает деформацию витка в своей плоскости и ее влиянием на величину  $P_k$  в рамках принятых допущений можно пренебречь.

В соответствии с интегралом Мора запишем:

$$\delta = \int_0^{2\pi} \frac{M_t \cdot M_{t1}}{C} R d\varphi + \int_0^{2\pi} \frac{M_n \cdot M_{n1}}{B} R d\varphi, \quad (1)$$

где  $B$  – жесткость поперечного сечения проволоки при изгибе;  $C$  – жесткость

поперечного сечения проволоки при кручении;  $\varphi$  – угол текущего сечения, изменяется от 0 до  $2\pi$ ;  $R$  – радиус изгиба пружины.

Расчетная схема для определения контактного межвиткового усилия пружинного рабочего органа представлена на рис. 1.

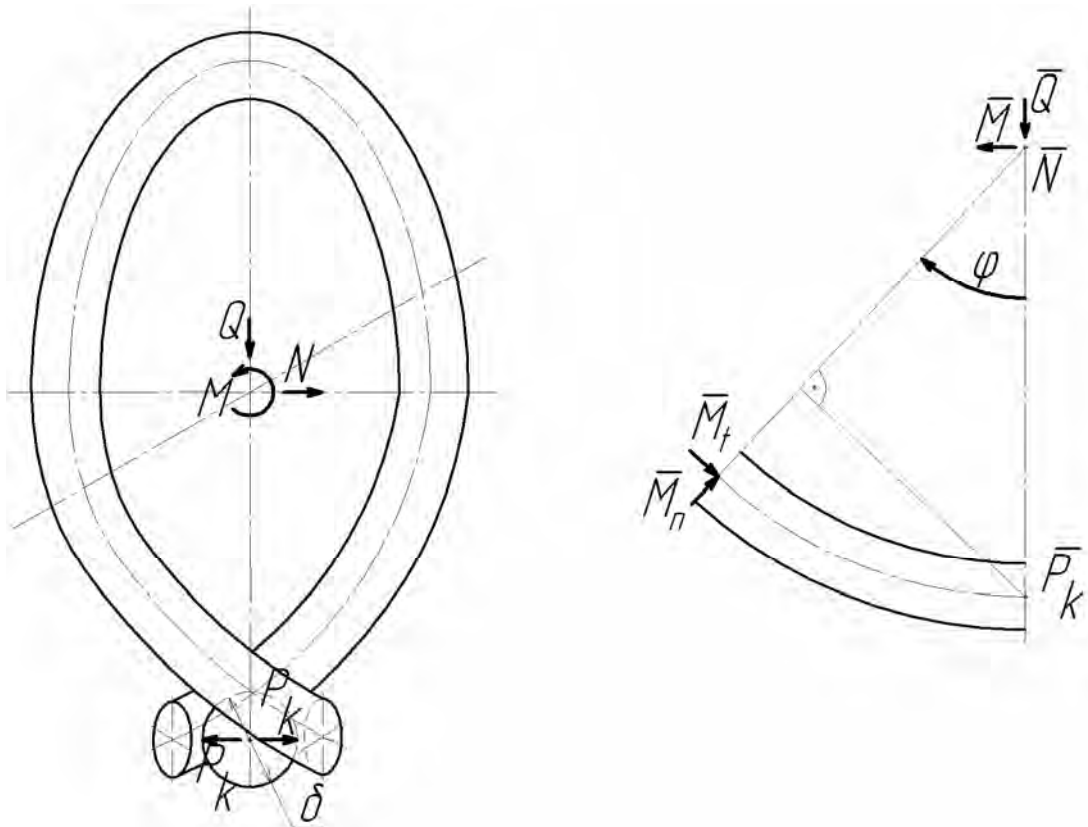


Рис. 1. Расчетная схема для определения контактного межвиткового усилия пружинного рабочего органа

Определим величины, входящие в подынтегральное выражение.

Величину крутящего момента в текущем сечении от внешнего изгибающего момента определим по формуле

$$M_t = M \cos \varphi - NR - P_k R (1 - \cos \varphi), \quad (2)$$

где  $M$  – изгибающий момент;  $N$  – продольная сила.

Величину изгибающего момента в текущем сечении от внешнего момента определим по формуле

$$M_n = M \sin \varphi + P_k R \sin \varphi. \quad (3)$$

Величина крутящего момента от единичной силы, действующего по оси X, определяется по формуле

$$M_{t1} = -R(1 - \cos \varphi). \quad (4)$$

Величина изгибающего момента от единичной силы, действующего по оси X, равна:

$$M_{n1} = R \sin \varphi. \quad (5)$$

В результате преобразований получим:

$$\begin{aligned} \delta = & \frac{1}{C} \int_0^{2\pi} [M \cos \varphi - NR - P_k R(1 - \cos \varphi)] \times \\ & \times [-R(1 - \cos \varphi)] R d\varphi + \frac{1}{B} \int_0^{2\pi} [M \sin \varphi + \\ & + P_k R \sin \varphi] \cdot [R \sin \varphi] R d\varphi = \pi R^2 \times \\ & \times \left[ \frac{1}{C} (M + 2NR - P_k R) + \frac{1}{B} (M + P_k R) \right]. \quad (6) \end{aligned}$$

Решая полученное уравнение и считая диаметр частицы  $\delta$  заданным, найдем зависимость для определения неизвестной величины  $P_k$ :

$$P_k = \delta \frac{B \cdot C}{\pi R^3 (C - B)} - \frac{M}{R} - \frac{2B}{C - B} N. \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что наличие растягивающего усилия  $N$  в пружине уменьшает величину контактного межвиткового усилия, однако сжимающее усилие увеличивает  $P_k$ , что является достаточно очевидным.

Наличие изгибающего момента  $M$ , вызывающего дополнительное сжатие витков в зоне сжатия, увеличивает контактное усилие  $P_k$ , которое обратно пропорционально величине радиуса пружины  $R$ .

При отсутствии внутренних силовых факторов  $M$  и  $N$  (например, в случае ненагруженной пружины, изготовленной без межвиткового зазора) попадание частицы в межвитковую зону вызывает усилие  $P_k$ :

$$P_k = \delta \frac{B \cdot C}{\pi R^3 (C - B)}. \quad (8)$$

Отметим, что данные зависимости

справедливы в предположении, что размер частицы мал по сравнению с характерными размерами пружины, и попадание частицы в межвитковое пространство не приводит к существенному изменению геометрии пружины.

Учитывая прочностные свойства измельчаемого материала, максимальное межвитковое контактное усилие определим по формуле

$$P_{k \max} = \frac{\sigma^2 b}{1,9 E S_1} (D_1^2 - d_1^2), \quad (9)$$

где  $\sigma$  – прочность материала на сжатие;  $b$  – ширина зоны дробления (принимается равной диаметру  $D_1$  частицы материала, входящей в межвитковое пространство) при максимальном шаге пружины;  $E$  – модуль упругости материала;  $S_1$  – разность между диаметром  $D_1$  и минимальным шагом пружины, т. е. величина деформации пружины;  $d_1$  – диаметр раздробленной частицы.

Были проведены экспериментальные исследования по определению контактного межвиткового усилия. Для этого были разработаны способ и устройство для его осуществления.

Способ определения контактных межвитковых усилий пружинных рабочих органов заключается в протягивании контрольного объекта, измерении усилия протягивания, при этом наличие контакта и значение усилия между смежными поверхностями соседних витков пружинных рабочих органов определяется по силе трения, возникающей между витками, по формуле

$$P_k = F_{mp} \cdot k_f \cdot k_\alpha \cdot k_v, \quad (10)$$

где  $F_{mp}$  – сила трения контрольного объекта, Н;  $k_f$  – коэффициент среды;  $k_\alpha$  – коэффициент, учитывающий угол между соседними витками;  $k_v$  – коэффициент, учитывающий скорость про-

тягивания контрольного объекта.

Устройство для осуществления способа определения контактных межвитковых усилий пружинных рабочих органов представлено на рис. 2. Оно содержит станину 1 с направляющими колоннами 2, траверсу 3, установленную с возможностью перемещения по колоннам 2, фиксируемую с помощью регулировочных винтов 4, опоры 5 для поддержания концов испытываемого пружинного рабочего органа

6, шарнирно связанного со станиной 1 и траверсой 3, а между траверсой 3 и станиной 1 по колоннам 2 перемещается дополнительная траверса 7 с механизмом протяжки контрольного объекта 8 и упором 9, позволяющим ограничить перемещение соседних витков пружинного рабочего органа 6 и имеющего направляющее отверстие для контрольного объекта 10. Упор перемещается по пазу 11 в дополнительной траверсе 7.

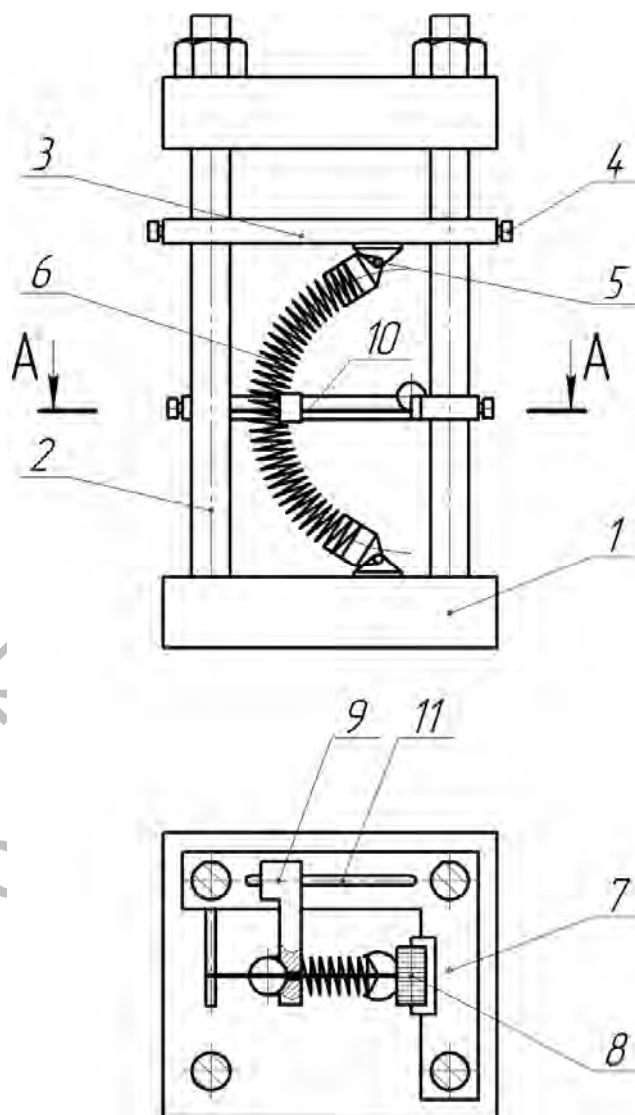


Рис. 2. Устройство для осуществления способа определения контактных межвитковых усилий пружинных рабочих органов

Устройство работает следующим образом. Испытываемый пружинный рабочий орган 6 закрепляется между станиной 1 и траверсой 3. Перемещая траверсу 3, создаем необходимый угол изгиба пружинного рабочего органа 6. Устанавливаем дополнительную траверсу 7 на высоте исследуемых витков. Положения траверсы 3 и 7 фиксируем винтами 4. Смещая упор 9 по пазу 11, закрепляем положение соседних испытуемых витков пружинного рабочего органа 6. С помощью механизма протяжки контрольного объекта 8 осуществляем протяжку контрольного объекта 10 в межвитковом пространстве. Фиксируем значения измерительных приборов.

В качестве измерительных приборов выступает динамометр для определения силы натяжения контрольного объекта.

Экспериментальные исследования по определению контактного межвиткового усилия частиц измельчаемых материалов стали возможны на основе идеи предложенного выше способа и устройства для его осуществления. Способ обеспечивает определение основных, самых важных характеристик пружинного рабочего органа.

В данном случае величина контактного межвиткового усилия пружинного рабочего органа определяется по силе трения, возникающей при протягивании меж-

ду смежными витками контрольного объекта, находящегося в специально созданной среде проведения процесса измельчения, характерной для большинства технологических переделов промышленных производств. При этом исследуемые объекты охватывают всю широту номенклатуры пружинных рабочих органов как по геометрическим, так и по силовым характеристикам. Их изготовление экономически оправдано, технически возможно на большинстве предприятий машиностроительной, лакокрасочной, строительной и других промышленности и может быть применимо для получения порошковых и пастообразных материалов.

Область исследования в рамках данной работы ограничена степенью влияния среды процесса измельчения, согласно факторам  $k_f$ ,  $k_a$ ,  $k_v$ , на определение контактного межвиткового усилия.

Контактное межвитковое усилие в малой степени зависит от скорости протяжки контрольного объекта, что подтверждается проведенными исследованиями и полученными результатами, отображенными на рис. 3.

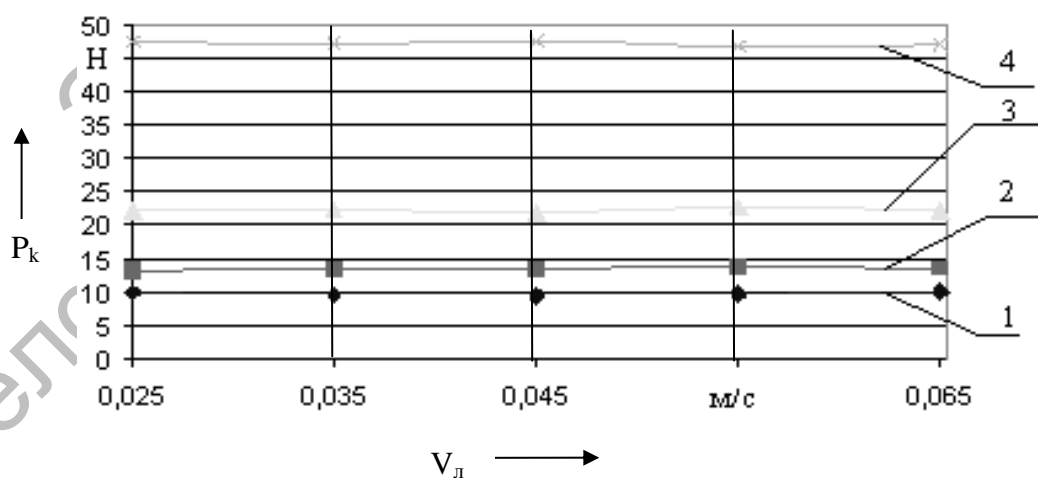


Рис. 3. Зависимость контактного межвиткового усилия от скорости протяжки контрольного объекта: 1 – пружина МЛ 0.05.00.006; 2 – пружина МЛ 1.00.00.022; 3 – пружина СММ 00.00.005; 4 – пружина Д80. 01.00.037

Выводом по данному исследованию может служить утверждение об отсутствии влияния скорости протяжки контрольного объекта на контактное межвитковое усилие. Из соображений упрощения исследований с точки зрения воспроизводимости результатов и уменьшения габаритов стенда была выбрана скорость протяжки  $V_{л} = 0,05$  м/с.

В процессе эксплуатации пружинных рабочих органов существует необходимость прогнозировать контактное межвитковое усилие в зависимости от угла между рабочими поверхностями соседних витков и среды, в которой происходит процесс измельчения (рис. 4, 5).

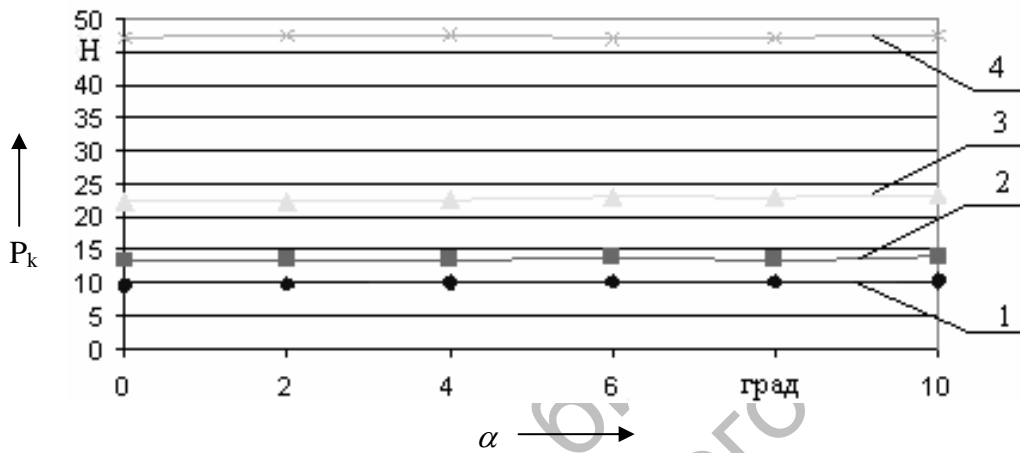


Рис. 4. Зависимость контактного межвиткового усилия от угла между соседними витками: 1 – пружина МЛ 0.05.00.006; 2 – пружина МЛ 1.00.00.022; 3 – пружина СММ 00.00.005; 4 – пружина Д80. 01.00.037

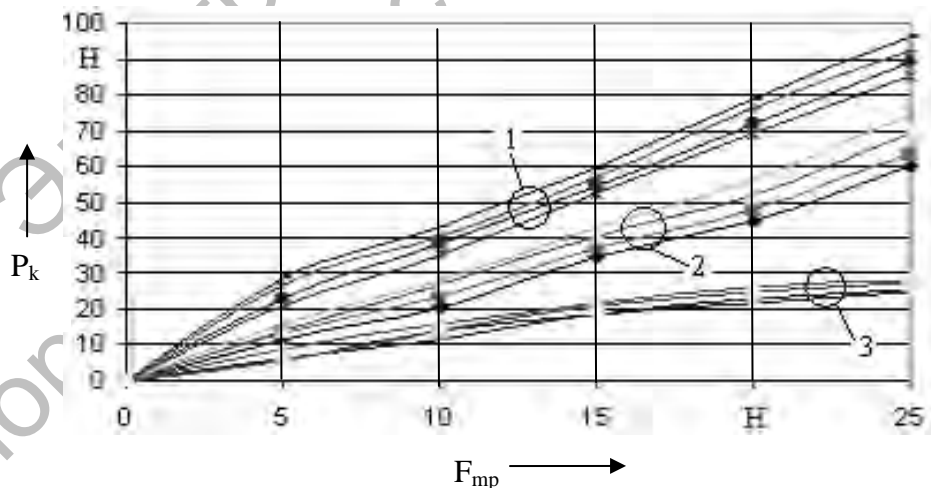


Рис. 5. Зависимость контактного межвиткового усилия от усилия протягивания контрольного объекта в разных средах для пружин с различными геометрическими параметрами и физико-механическими свойствами сталей: 1 – графики зависимости для пружин, работающих в абразивной среде; 2 – графики зависимости для пружин, работающих в сухой среде; 3 – графики зависимости для пружин, работающих в масляной среде

Из построенного графика видно, что существенного отличия в показаниях контактного межвиткового усилия от угла между витками не имеется.

Для пружин с различными геометрическими параметрами и различными физико-механическими свойствами стале-лей, из которых они изготовлены, при определении контактных межвитковых усилий в пружинном рабочем органе в различных средах (сухой, абразивной и масляной) получены следующие результаты, изображенные на рис. 5.

Из графиков ясно, что значительно-го влияния геометрических параметров пружины и свойств материала на контактное межвитковое усилие во всем диапазоне изменения усилия протягивания не наблюдается. Однако, если рассмотреть влияние среды на контактное межвитковое усилие, то можно сделать вывод, что среда очень сильно влияет на величину измеряемого контактного межвиткового усилия.

Таким образом, на определение контактного межвиткового усилия в различных средах измельчения в большей степени оказывает влияние среда, чем угол постановки пружины и скорость протяжки контрольного объекта.

Подводя общий итог вышесказанному, можно сделать вывод, что за счет

использования предложенных методик теоретического и экспериментального определения контактного межвиткового усилия, можно экономить время и ресурсы в процессе эксплуатации и ремонта аппаратов с пружинными рабочими органами, приостанавливать их эксплуатацию, если недостаточна величина контактного межвиткового усилия (независимо от причины возникновения отказа), что исключает неэффективное использование пружинных рабочих органов и аппаратов на их основе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сиденко, П. М. Измельчение в химической промышленности / П. М. Сиденко. – М. : Химия, 1977. – 368 с.
2. Ходаков, Г. С. Тонкое измельчение строительных материалов / Г. С. Ходаков. – М. : Стройиздат, 1972. – 240 с.
3. Ребиндер, П. А. Физико-химическая механика – новая область науки / П. А. Ребиндер. – М. : Знание, 1958. – 64 с.
4. Ходаков, Г. С. Физика измельчения / Г. С. Ходаков. – М. : Наука, 1972. – 307 с.
5. Кургузиков, А. М. Разработка и исследование пружинных аппаратов для измельчения и активации строительных материалов : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.16 : защищена 30.11.95 утв. 25.03.96 / Кургузиков Александр Михайлович. – Белгород, 1995. – 283 с. – Библиогр. : с. 224–245. – 23 с.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 16.03.2007

**A. M. Kurguzikov, N. V. Volkov, K. V. Novoseltsev**  
**Definition of contact forces between adjacent coils of spring working members at various ways of crushing**  
Belarusian-Russian University

In the article have been considered questions of a theoretical and experimental ways of definition contact forces between adjacent coils of spring working members in devices for crushing materials at dry and wet millings, the special device for realization of this way that will allow to save essentially in the further time and resources while in service and repair of devices is offered, and also to exclude inefficient use of spring working members.