

**Висновки.** Експериментальні дослідження вказують на те, що коефіцієнт проникності до певної міри залежить від властивостей фільтрувального елемента і рідини. Ця залежність пояснюється такими факторами:

- при фільтрації рідин, особливо мінеральних мастил, в фільтроелементі утворюються адсорбційні плівки між твердим тілом і рідиною, що зменшує коефіцієнт проникності. Товщина адсорбційної плівки залежить, у свою чергу, від фізико-хімічних властивостей рідини, фільтроелемента і температури. Це особливо важливо для фільтрів тонкої очистки технологічних рідин;

- в процесі фільтрації мінеральних мастил у фільтрувальному матеріалі утворюються застійні зони рідини, що не беруть участь в загальному русі. За даними Лейбена Л.З. об'єм застійної рідини в порах при ламінарному режимі може досягати 13-37%.

При дослідженні процесу фільтрації необхідно враховувати, що лінійний закон фільтрації справедливий лише при малих швидкостях руху рідини при фільтрації. У цьому випадку рух рідини буде ламінарним. В потоці переважають сили зчеплення, а сили інерції в порівнянні з силами зчеплення незначні.

При значному збільшенні швидкості руху рідини при фільтрації сили інерції можуть стати сумірними з силами зчеплення. В цьому випадку лінійний закон фільтрації порушується, і закон Дарсі стає неприйнятним. Порушення лінійного закону фільтрації виявляється в тому, що при певному збільшенні швидкості фільтрації втрати напору зростають швидше за швидкість.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Жужиков В.А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий / Жужиков В.А. – М.: Химия, 1968. – 411с.
2. Шейдеггер А. Физика течения жидкостей через пористые среды / Шейдеггер А. – М., 1960. – 137с.
3. Молчанов В.Ф. Дослідження фільтрувальної здатності сітчастих елементів / В.Ф.Молчанов, І.Ю.Володько, С.М.Кузьмін // Математичні проблеми технічної механіки-2011: міжнар. наук. конф., 13-16 квітня 2011р.: матеріали конф. (Том 2). – Дніпропетровськ-Дніпродзержинськ, 2011. – С.142-143.

*Надійшла до редколегії 31.05.2012.*

УДК 676.163.022

КАМЕЛЬ Г.И., д.т.н., профессор  
ПОПОВ С.Н.\*, д.т.н., доцент  
ЯКОВЛЕВА А.Г.\*, инженер

Днепропетровский государственный технический университет

\*Запорожский национальный технический университет

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНИЧЕСКОЙ ТРИБОСИСТЕМЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ТРАНСПОРТА

**Введение.** В своей работе [1] Костецкий Б.Н. прогнозировал большое будущее коническим трибосистемам в автоматизированных системах благодаря равномерному износу сопрягаемых конических поверхностей, корпус которых неподвижен, а ротор вращается в нем; возможности компенсации зазора между деталями конических трибосистем (КТС), образовавшегося в результате износа.

В химической промышленности для транспортирования гидросмеси (30% древесного сырья и 70% щелочи с температурой 160°C) широко используются конические питатели шведской фирмы Камюр (более 500 установок в мире, вырабатывающих более 85% целлюлозы, идущей на производство писчей бумаги, картона, пороха, клея и исходного сырья для химической промышленности).

Надежная работа роторных питателей промышленного транспорта (ПТ) связана с состоянием поверхности сопрягаемых деталей, наличием сложных, разнородных по своей природе физических процессов, которые протекают на поверхностях трения и влияют на эти процессы. Отсутствие информации о влиянии внешних факторов на эксплуатационную надежность деталей питателей КТС тормозят процессы изучения закономерностей износа узлов трения КТС на стадии проектирования, эксплуатации, изготовления и ремонта [2].

Анализ литературных источников показал, что в настоящее время отсутствует описание внешних факторов, имеющих место при эксплуатации и ремонте питателя КТС.

**Постановка задачи.** Целью работы является описание конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров, влияющих на надежность и долговечность конических роторных питателей (РП).

**Результаты работы.** Рассмотрим систему регулирования уровня щелочи, концентрации гидросмеси в верхней части варочного котла и особенности физических процессов, происходящих в питательной трубе.

*Ротор не вращается.* Работают две трассы циркуляции щелочи – низкого давления (ЦЩНД) и высокого давления (ЦЩВД) – в автономном режиме по скрещивающимся трассам сквозных карманов двухсекционного ротора [2-5].

Расход и скорость щелочи в трассах ЦЩНД и ЦЩВД имеют постоянные значения для любого положения ротора и определяются производительностью насоса циркуляции щелочи. Это объясняется тем, что согласно проведенным кинематическим расчетам с последующей математической обработкой установлено, что площади сопряжений окон корпуса и окон сквозных карманов в каждой секции ротора подчиняются закону гармонических колебаний (колебания происходят по отнулевому циклу с определенной амплитудой, периодом и частотой). Следовательно, расход и скорость щелочи через эти сопряжения тоже будут изменяться по закону гармонических колебаний со своей амплитудой, периодом и частотой [2].

В процессе работы питателя необходимо установить оптимальные соотношения между частотой вращения ротора и скоростью поступления щелочи в карманы ротора. Из работ [2-5] видно, что дуговой градус сопряжения окон ротора и окон загрузки корпуса для двух секций изменяется по синусоидальному отнулевому закону в пределах от нуля и 45°. Средний дуговой градус сопряжения окон ротора и окон загрузки корпуса представляет линейную зависимость с отклонениями от 43 до 45° и является величиной постоянной в течение оборота.

Следовательно, площадь окон карманов ротора и окон загрузки корпуса есть величина постоянная и определяется по формуле

$$S_1 = L \cdot d_{cp} \cdot \sin(\alpha_1 / 2), \quad (1)$$

где  $S_1$  – средняя площадь сопряжения ротора и окон загрузки корпуса, м<sup>2</sup>;

$L$  – длина ротора, м;

$d_{cp}$  – средний диаметр ротора, м;

$\alpha_1$  – средний дуговой градус сопряжения окон ротора и окон загрузки корпуса, град.

Определяем скорость щелочной среды в кармане ротора

$$V_1 = Q / S_1, \text{ м/с}, \quad (2)$$

где  $Q$  – производительность сопряжения окон ротора и окон загрузки корпуса, м<sup>3</sup>/с.

Время загрузки кармана ротора щепой определяется:

$$t_1 = d_{cp} / V_1, \quad (3)$$

где  $t_1$  – среднее время загрузки в кармане ротора, с.

Время сопряжения окон ротора и окон загрузки корпуса определяем при вращении ротора для трех значений, соответствующих продолжительности времени  $t_2 = 4,3; 2,8$  и  $1,64$  с.

Суммарная площадь сопряжений окон корпуса и окон сквозных карманов ротора есть величина постоянная. Это достигается тем, что сквозные окна ротора одной секции смещены относительно другой секции ротора на  $45^\circ$ .

Площадь сопряжения в поперечном сечении сквозных карманов движущегося ротора КТС есть величина постоянная, а ее площадь в любой момент времени определяется по формуле:

$$S = S_1 + S_2 = L_1 \cdot l_1 + L_2 \cdot l_2 = \left( \frac{L_1 \pi d_{cp}}{360^\circ} \cdot \alpha_1 \right) + L_2 \frac{\pi d_{cp}}{360^\circ} + (\alpha_1 + 45^\circ), \quad (4)$$

где  $S$  – суммарная площадь, м<sup>2</sup>;

$S_1, S_2$  – площади поперечного сечения 1-й и 2-й секций, м<sup>2</sup>;

$L_1, L_2$  – ширина окна 1-й и 2-й секций ротора, м;

$l_1 (l_2) = d_{cp}$  – средний диаметр в каждой секции ротора, м;

$\alpha_1 = 45^\circ$  – угол сопряжения окон загрузки корпуса и окон карманов ротора в 1-й секции плоскости, град;

$\alpha_1 + 45^\circ$  – угол поворота окон ротора 2-й секции, град.

Автономную работу двух трасс ЦЩНД и ЦЩВД обеспечивают запорные функции 50% конических сопрягаемых поверхностей ротора и корпуса, через зазоры которых осуществляются протечки щелочи из варочного котла в питательную трубу. Для любого положения ротора длина зазора на любом из 4-х участков каждой секции корпуса изменяется по закону гармонических колебаний с амплитудой от  $L_{\text{мин}}$  до  $L_{\text{мак}}$  со своей частотой. Следовательно, и скорость, и расход протечек щелочи через зазоры будут подчиняться закону гармонических колебаний. Тогда средняя длина зазора, средний расход и скорость протечек щелочи на всех 8-и участках корпуса двух секций секторов будут величинами постоянными, что обеспечивает постоянный уровень щелочи в питательной трубе, в результате чего обеспечивается надежное регулирование и управление уровнем щелочи.

*Ротор вращается.* При автономной работе двух трасс из каждой трассы через скрещивающиеся карманы вращающегося ротора происходит обмен определенных объемов щелочи, величина которых зависит от частоты вращения ротора и колеблется от 20% ( $n = 1/15 \text{ с}^{-1}$ ) до 50% ( $n = 2/15 \text{ с}^{-1}$ ).

Количество щелочи, проходящей из одной трассы в другую и наоборот, изменяется от 20% до 50% и прямо пропорционально объему щепы, т.е. определяет производительность всей установки.

Для оценки загрузочной способности питателя вводится понятие кратности циркуляции щелочного раствора через сквозные карманы вращающегося ротора:

$$K = \theta / t \cdot V, \quad (5)$$

где  $\theta$  – производительность насоса, м<sup>3</sup>/с;

$t$  – время сопряжения окон ротора и корпуса, с;

$V$  – объем кармана ротора, м<sup>3</sup>.

При вращении ротора длина зазора на участках сопряжений в 1-й секции изменяется по синусоидальному закону, а во второй секции тоже по синусоидальному закону, но сдвинута по фазе на 45°. Суммарная длина зазора на двух участках в разных секциях корпуса постоянная, что обуславливает постоянный расход протечек щелочи, уровень щелочи, обеспечивает постоянный уровень щелочи в питательной трубе.

*Подача щепы.* Технологический поток щепы поворачивается на 90°, а концентрация щепы в гидросмеси изменяется по всей трассе от 100% до 30% и наоборот.

Для повышения производительности питателя, повышения концентрации щепы в кармане ротора при загрузке, снижения износа сит, ротора и корпуса, а также облегчения прохождения срезанной щепы через диаметральные щели в ситах шириной 6-8 мм предложено ввести в питатель режущее устройство, состоящее из 7 режущих кромок, располагающихся на роторе, ситах и корпусе.

При переходе кармана ротора из горизонтального положения в вертикальное в нем возрастает давление в 10 раз, что сопровождается появлением гидроударов и вибраций в питателе. Рассмотрена теория образования гидроударов. Приведены характеристики гидроударов (величина гидроудара, скорость распространения гидроудара и его продолжительность). Даны рекомендации по снижению гидроударов в питателе, что позволило увеличить надежность и долговечность ТЗС [3].

*Термическая подготовка щепы.* В трубах пропарочной камеры на длине 12-16 метров трассы осуществляется пропаривание щепы при ее одновременном разогреве и вращении. Определены оптимальные режимы термической обработки щепы (скорость перемещения щепы, частота вращения шнека, температура пропаривания). При пропаривании щепы с ее поверхности удаляется скипидар и другие летучие соединения. Термическая обработка щепы позволяет совместить процесс транспортировки и технологический процесс термической подготовки щепы, что сокращает процесс варки в варочном котле и улучшает качество получаемой целлюлозы [2, 3].

Анализ декомпозиции функций, выполняемых рабочими коническими поверхностями ротора и корпуса, показал, что: 1) на 40% конических поверхностей ротора и корпуса имеет место загрузка (25%) и выгрузка (15%); 2) на 50% поверхности ротора и корпуса выполняются запорные функции, т.е. отделяют область варочного котла от питательной трубы и 3) на 10% оснований и средних перемычек ротора и корпуса в процессе эксплуатации сохраняется конусность и осуществляется компенсация зазора. Эти 50% поверхности подвергаются интенсивному гидроабразивному износу за счет протечек щелочи, содержащей твердые частицы, а 10% – ударно-гидроабразивному износу при скольжении. Декомпозиция функций по коническим поверхностям деталей питателя позволяет установить оптимальные размеры ротора и корпуса. [3, 4].

*Система регулирования уровня щелочи в питательной трубе.* Из структурно-алгоритмической схемы и математической модели [2] была выявлена вспомогательная отрицательная связь – регулируемая величина – уровень щелочи в питательной трубе. Установим составные элементы системы регулирования уровня щелочи в питательной трубе: уровень щелочи в питательной трубе – регулируемая величина; измерительное устройство для замера уровня щелочи в питательной трубе – радиоактивные датчики, световая и звуковая сигнализации; возмущающее воздействие – расход протечек щело-

чи из зазоров питателя от варочного котла в питательную трубу и регулирующий орган – механизм присадки ротора (уменьшает зазор в питателе).

Материальный баланс потоков щепы, щелочи и гидросмеси, поступающих и убывающих из питательной трубы: расход щепы постоянный и регулируется дозатором щепы; расход щелочи низкого давления постоянен и определяется законом гармонических колебаний в каждой секции карманов вращающегося ротора; расход гидросмеси, поступающей из питательной трубы в карманы вращающегося ротора – постоянная величина и подчиняется гармонически колебаниям; расход протечек щелочи через зазоры в питателе подчиняется закону гармонических колебаний и изменяется в процессе эксплуатации.

Из всех перечисленных потоков щепы, щелочи и гидросмеси переменной величиной является расход протечек щелочи, который в свою очередь зависит от куба величины зазора [2]. В свою очередь величина зазора зависит от износостойкости используемых материалов и от концентрации твердых частиц в щелочи. Исследования показали, что концентрация твердых частиц в щелочи зависит от объема привозной щепы. Наибольшая концентрация твердых частиц обнаружена в щелочи на Соломбальском комбинате, где вагонами и автофургонами доставляется 100% щепы, наименьшая – соответственно на Братском комбинате, где привозится 5% технологической щепы. На каждом комбинате имеются циклоны для очистки щелочи. За сутки из циклона освобождается 100-120 кг твердых частиц (песок, глина, уголь, гравий, шлам и т.д.). Анализ качества очистки щелочи показал, что известные установки очищают 97-98% твердых частиц, с другой стороны эти установки очищают только крупную фракцию. Неочищенными остаются твердые частицы размерами 10, 15 и 50 МКМ. Поэтому в щелочи всегда имеются твердые частицы мелкой фракции, следовательно, всегда будет иметь место гидроабразивный износ.

Анализ состояния износа на рабочих поверхностях ротора и корпуса [2-4] показал, что 50% рабочих поверхностей подвергается интенсивному гидроабразивному износу больше на 50 МКМ, чем 10% поверхностей оснований и средних перемычек ротора и корпуса. Даны рекомендации по выравниванию износа на всех участках корпуса и ротора.

*Механизм присадки ротора.* Для компенсации зазора в питателе используется механизм присадки ротора, который представляет собой винтовой механизм, преобразующий вращательное движение в поступательное. При повороте маховика привода на два оборота (720°) происходит осевое перемещение ротора на 2мм (2000 МКМ); при конусности 1:20 величина зазора в питателе уменьшается на 50 МКМ [2, 3].

*Анализ двух схем компенсации зазора. Компенсация критического зазора (ККЗ)* – патологический режим эксплуатации рекомендован фирмой Камюр и осуществляется один раз в неделю с уменьшением зазора на 50 МКМ. При ККЗ из-за того, что износ по образующей ротора неравномерный, на основаниях и средних перемычках ротора и корпуса имеет место граничное трение, которое сопровождается явлениями заклинивания, схватывания и заедания ротора относительно корпуса. Для уменьшения износа при граничном трении на этих участках производственники увеличили мощность двигателя вращения ротора с 8 кВт до 50 кВт. При этом интенсивность износа увеличилась, но при этом начали разрушаться крепежные болты и цапфы ротора. При такой схеме компенсации более 95% всех внеплановых снятий с эксплуатации питателей происходило при выполнении компенсации критического зазора (ККЗ). Поэтому была предложена другая схема эксплуатации.

*Принудительная микротолчковая схема компенсации зазора (ПМКТКЗ).* ПМКТКЗ осуществляется один раз в сутки. Для уменьшения зазора в питателе на 5-6 МКМ необходимо повернуть маховик привода ротора на 90°, что равносильно перемещению ротора в осевом направлении на 250 МКМ. При этом на всех участках со-

пряжения ротора с корпусом имеют место жидкостное трение-скольжение и соизмеримая величина износа. На участках ротора и корпуса по секторам имеет место гидроабразивный износ, а на основаниях и средних перемычках ротора и корпуса – ударно-гидроабразивный износ под действием гидроударов (в зону трения нагнетается принудительно щелочь с мелкими твердыми частицами). При ПМКТКЗ сохраняется постоянный уровень щелочи в питательной трубе, что и обеспечивает надежную эксплуатацию питателя и всей ТЗС [2-4].

*Схема регулирования концентрации гидросмеси в верхней части варочного котла.* Рассмотрим материальный баланс щепы, щелочи и гидросмеси в верхней части варочного котла: гидросмесь, поступающая в верхнюю часть варочного котла, является возмущающим воздействием на концентрацию щепы в гидросмеси; нагрузка на привод шнека – регулируемая величина; приборы для замера нагрузки на привод шнека – измерительное устройство и регулирующее устройство-дозатор щепы. При возрастании концентрации щепы в гидросмеси в верхней части варочного котла возрастает нагрузка на привод шнека, при этом срабатывает сигнал на обмотке возбуждения, и двигатель механизма вращения дозатора щепы уменьшает свои обороты – замедляется подача гидросмеси в верхнюю часть варочного котла. При уменьшении нагрузки на привод шнека соответственно увеличивается подача щепы дозатором. Такая схема позволяет поддерживать в верхней части варочного котла постоянную концентрацию щепы в гидросмеси.

**Выводы.** Для повышения надежности и долговечности промышленного транспорта необходимо оптимизировать следующие параметры:

1) конструктивные (винтовой механизм присадки; оптимальные размеры окон в роторе, корпусе, оптимальные размеры питательной трубы и пропарочной камеры, оптимальные углы в резательном механизме и т.д.);

2) технологические (в процессе ремонта обеспечить оптимальные режущие углы на роторе, ситах и корпусе; рекомендации по выбору материалов для изготовления и сварочных материалов при ремонте деталей роторных питателей с учетом режимов термообработки и мехобработки);

3) эксплуатационные (принудительная микротолчковая компенсация зазора; оптимальная частота вращения ротора; постоянный расход и скорость циркуляции щелочи высокого и низкого давлений; регулирование уровня щелочи в питательной трубе).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Костецкий Б.Н. Надежность и долговечность машин, техники / Б.Н.Костецкий., Н.Г.Носовский., Д.Н.Бершавский. – Киев, 1975. – 408с.
2. Нечаев Г.И. Повышение надежности и продуктивности загрузочных устройств непрерывной целлюлозы и полуцеллюлозы: монография / Г.И.Нечаев, Г.И.Камель. – Луганск: Из-во ВНУ им. В.Даля, 2005. – 392с.
3. Камель Г.И. Роторные питатели установок непрерывной варки целлюлозы / Камель Г.И. – М.: Лесная промышленность, 1987 – 160с.
4. Камель Г.И. Снижение гидроударов по торцу вращающегося ротора Камюр / Г.И.Камель, А.Г.Яковлева // Сб. науч. тр.: строительство, материаловедение. Машиностроение. – Днепропетровск: ПГАСА. – 2006. – Вып. 36, ч. 3. – 232с.
5. Нечаев Г.И. Повышение надежности и продуктивности загрузочных устройств непрерывной варки целлюлозы и полуцеллюлозы: монография / Г.И.Нечаев, Г.И.Камель. – Луганск: Изд-во СНУ им. В.Даля, 2005. – 392с.

*Поступила в редколлегию 26.04.2012.*