

УДК 676.2.052.4/7

О.А. ТЕРЕНТЬЕВ, В.С. КУРОВ, А.И. ЛЬВОВ

С.-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров



Терентьев Отто Алексеевич родился в 1934 г., окончил в 1958 г. Ленинградский политехнический институт, доктор технических наук, профессор, ректор С.-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров, академик. Имеет 450 научных трудов в области гидродинамики и реологии водно-волоконистых суспензий.



Куров Виктор Сергеевич родился в 1953 г., окончил в 1976 г. Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе С.-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров. Имеет около 100 научных трудов в области гидродинамики и реологии водно-волоконистых суспензий.



Львов Александр Иванович родился в 1962 г., окончил в 1985 г. Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры процессов и аппаратов химической технологии С.-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров. Имеет 12 научных трудов в области гидродинамики и реологии водно-волоконистых суспензий.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ СМЕСИТЕЛЬНЫХ НАСОСОВ БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ МАШИН ПРИ МИНИМАЛЬНОМ УРОВНЕ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ

Представлена методика расчета пульсаций давления на оборотной частоте смесительного насоса при массоподаче на бумагоделательную машину и результаты ее практической реализации.

The calculation procedure of pressure pulsations at revolution frequency of pump mixer upon stock feed to papermaking machine as well as the results of its practical realization have been presented.

Одним из реально существующих способов повышения производительности бумагоделательных машин (БДМ) является увеличение их скорости. Это, в свою очередь, неизбежно приводит к увеличению скорости подачи бумажной массы к напорному ящику, определяемой напорно-расходными характеристиками насосов массоподводящих систем. Увеличение напора вызывает возрастание уровня низкочастотных пульсаций давления, генерируемых смесительными насосами, и, как следствие, повышение массоемкости бумажного полотна и неоправданно завышенный расход дорогостоящего волокнистого материала.

На современных БДМ, как правило, применяют высокооборотные смесительные насосы двухстороннего всасывания. В этом случае лопастные частоты лежат в области спектра свыше 50 Гц и не оказывают заметного влияния на равномерность бумажного полотна. С точки зрения воздействия на распределение массы 1 м^2 бумаги значительно опаснее пульсации давления на оборотной частоте, лежащие в низкочастотной области спектра и обладающие значительной энергией.

Разработанные физические представления о генерировании пульсаций давления на оборотной частоте смесительных насосов позволили сделать вывод, что наиболее вероятной причиной их возникновения является неравномерность полей радиальных скоростей и давлений в спиральном отводе [1].

Для расчета уровня пульсационных возмущений воспользуемся дифференциальным уравнением физической системы, на которую действует вынуждающая гармоническая сила [3]:

$$\ddot{r} + 2b\dot{r} + p^2r = f_0 \cos \omega t, \quad (1)$$

где r – положение центра масс относительно начала координат;

b – коэффициент статической перегрузки системы;

p – частота собственных колебаний;

f_0 – вынуждающая сила, отнесенная к единице массы;

ω – круговая частота вынужденных колебаний;

t – время.

Общим решением уравнения (1), без учета свободных затухающих колебаний, является выражение

$$r = B_0 \cos(\omega t - \varphi), \quad (2)$$

где B_0 – максимальная амплитуда колебаний;

φ – угол сдвига фазы колебаний, определяемый диссипацией энергии за счет сил трения.

Подставив общее решение (2) в уравнение (1) и заменив \cos и \sin разности по формулам приведения, а также собрав члены с общими множителями $\cos\omega t$ и $\sin\omega t$, получим систему из двух уравнений в начальный момент времени:

$$B_0(p^2 - \omega^2) \cos\varphi + 2B_0 b \omega \sin\varphi = f_0; \quad (3)$$

$$B_0(p^2 - \omega^2) \sin\varphi - 2B_0 b \omega \cos\varphi = 0.$$

Решим систему (3) относительно B_0 и φ :

$$B_0 = \frac{f_0}{\sqrt{(p^2 - \omega^2)^2 + (2b\omega)^2}}; \quad (4)$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{2b\omega}{p^2 - \omega^2}.$$

Разделим числитель и знаменатель на p^2 и проведем замену $2b$ согласно [4]:

$$\delta = b \frac{2\pi}{p},$$

где δ – логарифмический декремент затухания колебаний.

Тогда

$$B_0 = \frac{f_0}{p^2 \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{p^2}\right)^2 + \left(\frac{\delta \omega}{\pi p}\right)^2}}; \quad (5)$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\delta}{\pi} \frac{\omega/p}{1 - (\omega/p)^2}.$$

С учетом коэффициента ослабления, отнесенного к частоте колебаний, запишем

$$\delta = \frac{2\pi\beta}{\omega}.$$

Здесь β – коэффициент ослабления, определяемый с учетом реологических характеристик бумажной массы [2].

Расчетные формулы для максимальной амплитуды колебаний центра масс и угла сдвига фаз, с учетом проведенных преобразований, приведем к следующему виду:

$$B_0 = \frac{f_0(1-A)^2}{2\omega^2\sqrt{A}}; \quad (6)$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{2(1-A)}{\sqrt{A}(2-A)},$$

где $A = \left(\frac{\beta}{\omega}\right)^2$.

Подставим выражения (6) в (2) и получим

$$r = \frac{f_0(1-A)^2}{2\omega^2\sqrt{A}} \left[\cos 2\pi - \cos \left(\omega t - \operatorname{arctg} \frac{2(1-A)}{\sqrt{A}(2-A)} \right) \right]. \quad (7)$$

Поскольку требуется определить пульсационные возмущения за один оборот ротора смесительного насоса, т.е. $\omega t = 2\pi$, то выражение (7) представим следующим образом:

$$P_o' = \rho g \left\{ \frac{f_0(1-A)^2}{2\omega^2\sqrt{A}} \left[1 - \cos 2\pi - \cos \left(\omega t - \operatorname{arctg} \frac{2(1-A)}{\sqrt{A}(2-A)} \right) \right] \right\}, \quad (8)$$

где P_o' — интенсивность пульсаций давления на оборотной частоте смесительного насоса, $P_o' = \rho g r$;
 ρ — плотность бумажной массы;
 g — ускорение силы тяжести.

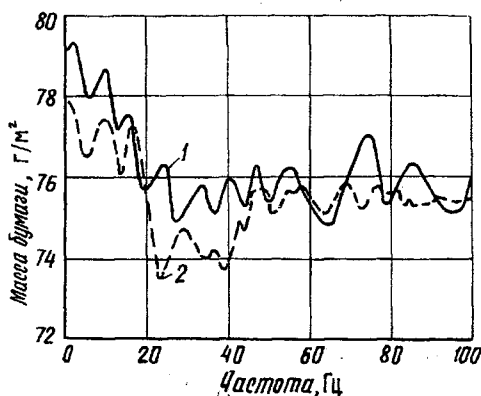
Формула (8) является базовой для определения интенсивности пульсаций давления на оборотной частоте без учета рециркуляции бумажной массы в спиральном отводе насоса, которая приводит к значительному изменению уровня пульсаций давления в выходном сечении нагнетательного патрубка.

Для расчета коэффициента рециркуляции I , зависящего от конструктивно-технологических параметров насоса, воспользуемся уравнением, предложенным нами в работе [2]:

$$I = \frac{Q_{\text{опт}} - Q + 0,5\omega b_3(r_3^2 - r_2^2)\eta_0}{Q_{\text{опт}} + 0,5\omega b_3 - (r_3^2 - r_2^2)\eta_0}, \quad (9)$$

где $Q_{\text{опт}}$, Q — соответственно оптимальная и текущая подача насоса;
 b_3 — ширина спирального отвода;
 r_3 и r_2 — радиус окружности, проходящей через оконечность языка спирального отвода, и радиус ротора насоса;
 η_0 — объемный КПД насоса.

Выражение (9) показывает, что коэффициент рециркуляции не является постоянной величиной, а зависит от расхода бумажной массы,



Спектры распределения массоемкости бумаги до (1) и после (2) модернизации БДМ

перекачиваемой насосом. Тогда, с учетом коэффициента рециркуляции, выражение (8) запишем как

$$P_o = I_{pg} \left\{ \frac{f_0(1-A)^2}{2\omega^2 \sqrt{A}} \left[1 - \cos \left(\arctg \frac{2(1-A)}{\sqrt{A(2-A)}} \right) \right] \right\}. \quad (10)$$

Для подтверждения разработанных теоретических положений были проведены исследования колебаний массы 1 м² бумаги на БДМ-3 Котласского ЦБК с одновременным замером пульсаций давления, генерируемых смесительным насосом. Анализ полученных экспериментальных данных позволил установить, что влияние напора на уровень пульсаций давления не является величиной постоянной, а зависит от положения рабочей точки на напорно-расходной характеристике.

На основе проведенного теоретического обоснования была осуществлена модернизация рабочего колеса смесительного насоса. Пульсации давления на характерных частотах (оборотная — 12 Гц, лопастная — 73 Гц) вызывали отклонения массоемкости бумаги (соответственно 2,6 и 1,1 г/м²).

Рабочая точка (см. рисунок) для массоподводящей системы БДМ-3 до модернизации находилась вне зоны оптимальных режимов. Ее смещение в зону оптимальных режимов после модернизации позволило снизить колебания массы 1 м² бумаги на оборотной и лопастной частотах соответственно в 1,5 и 2,2 раза. Следовательно, перемещение рабочей точки в зону оптимальных режимов приводит к уменьшению радиальной составляющей вынуждающей силы и, как следствие, к снижению уровня пульсаций давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Львов А.И., Куров В.С. Основы генерирования пульсаций давления на оборотной частоте смесительного насоса при подаче бумажной массы на бумагоделательную машину // Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: Межвуз. сб. науч. тр. / СПб. ГТУРП - СПб., 1995.