

УДК 676. 2. 052.

*В.С. КУРОВ, О.А. ТЕРЕНТЬЕВ, В.М. БОЛОТОВ*

.-Петербургский государственный технологический университет  
растительных полимеров  
Уральская государственная лесотехническая академия

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 более 90 научных трудов в области гидродинамики и реологии водно-волоконистых суспензий.



Терентьев Отто Алексеевич родился в 1934 г., окончил в 1958 г. Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина, доктор технических наук, профессор, академик, ректор С.-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров. Имеет 430 научных трудов в области гидродинамики и реологии водно-волоконистых суспензий.



Болотов Владимир Михайлович родился в 1954 г., окончил в 1976 г. Уральский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент Уральской государственной лесотехнической академии. Имеет около 20 научных трудов в области гидродинамики и реологии водно-волоконистых суспензий.



## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПУЛЬСАЦИОННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ МАССОПОДАЧЕ НА БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНУЮ МАШИНУ

Приведена методика расчета пульсаций давления в массоподводящих системах бумагоделательных машин.

The calculation methods of pressure fluctuations in pulp feeding systems of paper machines have been presented.

Расчет пульсаций давления в массоподводящих системах бумагоделательных машин является чрезвычайно сложной задачей ввиду необходимости учета многообразия факторов, оказывающих влияние на изменения динамических параметров в потоке бумажной массы. Это связано с установкой в системах подачи бумажной массы на бума-

годелательную машину различных машин и аппаратов, выполняющих специфические технологические функции и отличающихся оригинальностью исполнения проточной части, которая оказывает резкое воздействие на трансформацию проходящего потока и приводит к изменению пульсационных характеристик или генерированию новых с отличной частотой и амплитудой, а также реологическими особенностями бумажной массы [2].

В настоящее время динамические параметры движущейся жидкости определяют на основе передаточных функций с использованием импедансного метода. Его сущность заключается в том, что в расчетном сечении трубопровода граничные условия, записываемые обычно для давления и скорости, объединяются в одно условие – их линейную комбинацию. Тогда под импедансом понимают полное комбинированное сопротивление, представляющее отношение динамического давления к динамической скорости в данном сечении. Это позволяет учесть взаимное влияние различных элементов, что важно при проектировании массоподводящих систем. Для вычисления пульсаций давления необходимо определить амплитудно-частотные характеристики агрегатов или местных сопротивлений, входящих в массоподводящую систему. При этом конечной целью является установление взаимосвязи пульсаций давления на выходе из источника и напорного ящика, что и будет, главным образом, определять колебания массы  $1 \text{ м}^2$  бумаги.

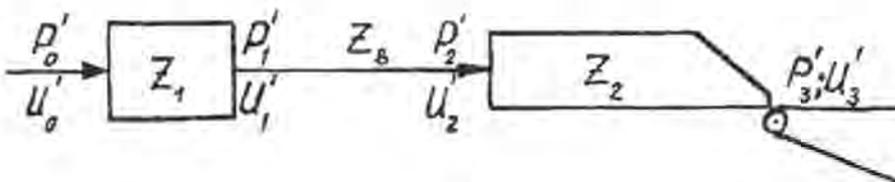
Известно, что передаточная функция любой сложной системы с последовательно соединенными агрегатами, к которым относятся и массоподводящие системы бумагоделательных машин, может быть представлена как произведение составляющих ее передаточных функций:

$$H(s) = \prod_{k=1}^n H_k(s), \quad (1)$$

где  $H(s)$  – передаточная функция системы.

При этом амплитудно-фазовая частотная характеристика как частный случай передаточной функции определяется перемножением амплитудно-фазовых частотных характеристик отдельных участков.

Представим массоподводящую систему бумагоделательной машины как расположенный в начале источник пульсаций давления и совокупность последовательно присоединенных элементарных участков. На рисунке показан расчетный участок системы, состоящий из источника пульсаций и агрегата системы, которые соединены простым трубопроводом постоянного сечения. Для массоподводящей системы таким участком, например, может быть узлоловитель – напорный ящик.



Основной принцип расчета заключается в том, чтобы при известном значении амплитуды пульсаций давления на выходе из источника  $P_1$  определить амплитуду пульсаций давления на выходе агрегата, в данном случае напорного ящика  $P_3$ , т. е. вычислить передаточную функцию участка  $H_{31}(\omega)$ :

$$H_{31} = \frac{P_3(\omega, I)}{P_1(\omega, \theta)}, \quad (2)$$

где  $\omega$  – круговая частота пульсаций.

Пульсации давления  $P_2$  на входе сопротивления  $Z_2$  определяются передаточной функцией  $H_{21}(\omega)$  при известных характеристиках пульсаций  $P_1$ , а пульсации  $P_3$  – функцией  $H_{32}(\omega)$  при известном  $P_2$ .

Тогда, с учетом вышесказанного, можно записать передаточную функцию для рассматриваемого участка массоподводящей системы:

$$H_{31}(\omega) = H_{21}(\omega)H_{32}(\omega). \quad (3)$$

Для определения передаточных функций с учетом реологических свойств бумажной массы была разработана система, состоящая из уравнения движения и уравнения неразрывности:

$$\frac{dU}{dt} + \frac{2(\tau_n - \sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\alpha_k \dot{\gamma}})}{\rho R} = -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx};$$

$$\frac{dU}{dx} = -\frac{1}{E_{np}} \frac{dP}{dt}, \quad (4)$$

где  $\tau_n$  – нестационарное касательное напряжение;

$\sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\alpha_k \dot{\gamma}}$  – реологический член, характеризующий структурные

изменения в потоке волокнистой суспензии;

$\rho$  – плотность суспензии;

$R$  – радиус трубопровода;

$E_{np}$  – приведенный модуль упругости.

Проведем при нулевых начальных условиях преобразование по Лапласу этих уравнений с использованием передаточной функции, связывающей нестационарное касательное напряжение и скорость. Данная передаточная функция впервые была получена Д.Н. Поповым [1] для ньютоновских сред. С учетом реологических особенностей бумажной массы она может быть записана как

$$H_{\tau u}(s) = \frac{2 \left[ \tau_n - \sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\alpha_k \dot{\gamma}} \right](s)}{U(s)}. \quad (5)$$

Тогда, с учетом полученной передаточной функции, систему (4) приведем к виду

$$\left[ \rho s + \frac{2H_w(s)}{R} \right] U(s) = -\frac{dP(s)}{dx}; \quad (6)$$

$$F_{np} \frac{dU}{dx} = -s p(s).$$

Уравнения (6) позволяют определить отклонения давления и скорости от установившихся значений в любом сечении массоподводящей системы бумагоделательной машины.

Для прямого трубопровода длиной  $l$  известна система уравнений, связывающая давление и скорость вязкой сжимаемой жидкости в начале и конце участка [1], однако она не учитывает фактор отражения от агрегатов и местных сопротивлений:

$$P_2'(s, l) = \operatorname{ch}[\Theta(s)l] P_1'(s, 0) - Z_b(s) \operatorname{sh}[\Theta(s)l] U_1'(s, 0);$$

$$U_2'(s, l) = \frac{1}{Z_b(s)} \operatorname{sh}[\Theta(s)l] P_1'(s, 0) + \operatorname{ch}[\Theta(s)l] U_1'(s, 0), \quad (7)$$

где  $\Theta(s)$  – операторный коэффициент распространения возмущений при распространении затухающих гармонических колебаний;

$Z_b(s)$  – операторное волновое сопротивление участка трубопровода.

Необходимо отметить качественную сходимость данных уравнений как для ньютоновских, так и неньютоновских сред, к которым относится бумажная масса. Количественные отклонения связаны с реологическими особенностями, характерными для суспензий бумажной массы. В целях определения уровня пульсационных возмущений на выходе из напорного ящика перейдем к исходной передаточной функции. Для этого из системы (7) исключим  $U_1'(s, 0)$  и  $U_2'(s, l)$ . В соответствии с определением импеданса введем граничные условия, связывающие пульсации давления в начале и конце трубопровода с импедансами источника и напорного ящика:

$$P_1'(s, 0) = Z_1(s) U_1'(s, 0); \quad P_2'(s, l) = Z_2(s) U_2'(s, l), \quad (8)$$

где  $Z_1(s)$  и  $Z_2(s)$  – импедансы в начале и конце расчетного участка.

Это позволит учесть фактор отражения пульсаций давления. Подставим граничные условия во второе уравнение системы (7), обозначив  $\varphi_l = [\Theta(s)l]$ . После преобразований получим передаточную функцию для участка трубопровода с учетом отражения:

$$H_{21}(s) = \frac{P_2'(s, l)}{P_1'(s, 0)} = \frac{Z_2(s)}{Z_1(s)} \operatorname{ch} \varphi_l - \frac{Z_2(s)}{Z_b(s)} \operatorname{sh} \varphi_l. \quad (9)$$

Аналогично найдем передаточные функции для агрегатов, расположенных в начале и конце участка:

$$H_{20}(s) = \frac{P_2'(s, l)}{P_0'(s)} = \frac{\operatorname{ch} \varphi_l + \frac{Z_b(s)}{Z_2(s)} \operatorname{sh} \varphi_l}{\left[ 1 + \frac{Z_1(s)}{Z_2(s)} \right] \operatorname{ch} \varphi_l + \left[ \frac{Z_b(s)}{Z_2(s)} + \frac{Z_1(s)}{Z_b(s)} \right] \operatorname{sh} \varphi_l}; \quad (10)$$

$$H_{32}(s) = 1 + \frac{Z_2(s)[Z_1(s)\operatorname{sh} \varphi_l - Z_b(s)\operatorname{ch} \varphi_l]}{Z_b(s)[Z_1(s)\operatorname{ch} \varphi_l + Z_b(s)\operatorname{sh} \varphi_l]}, \quad (11)$$

Передаточную функцию агрегата определим экспериментально на основе взаимного спектрального анализа как совокупность амплитудной и фазовой частотных характеристик.

Комплексное волновое сопротивление трубопровода, а также импедансы устройств, подключенных к его концам, запишем в виде суммы активных и реактивных составляющих:

$$Z_b(j\omega) = R_b + jx_b; Z_1(j\omega) = R_1 + jx_1; Z_2(j\omega) = R_2 + jx_2, \quad (12)$$

где  $R_1$  – активная составляющая импеданса;

$x_1$  – реактивная составляющая импеданса.

Если известны волновое сопротивление участка трубопроводной линии и импедансы местных сопротивлений, то по приведенным выше зависимостям можно определить основные пульсационные характеристики агрегата массоподводящей системы. Если же его импеданс неизвестен, возникает необходимость решения обратной задачи, т. е. определения импеданса по амплитудной и фазовой частотным характеристикам устройства, полученным экспериментальным путем. Значение амплитудной характеристики показывает отношение уровня пульсаций давления на выходе агрегата к уровню пульсаций на его входе. Фазовая характеристика имеет значение угла, измеренного в радианах, и показывает сдвиг фазы между входным и выходным сигналами.

Таким образом, полученные теоретические зависимости позволяют определить передаточную функцию как расчетного участка, в состав которого могут входить любые агрегаты, так и всей массоподводящей системы в целом. Обобщенная оценка динамических характеристик в системе массоподвода дает возможность установить влияние любого агрегата на качество напуска, прогнозировать изменение условий напуска, а следовательно, колебания массы  $1 \text{ м}^2$  бумажного полотна при конструктивных или технологических изменениях в системе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. - М.: Машиностроение, 1982. - 240 с. [2]. Терентьев О.А., Куров В.С., Смирнова Э.А. Реологические основы процесса массоподдачи на бумагоделательную машину // Лесн. журн. - 1992. - № 1. - С. 85-89. - (Изв. высш. учеб. заведений).

Поступила 25 мая 1995 г.