

УДК 621.1

Ф. Г. БАКИРОВ, Р. А. СУНАРЧИН, Г. Ф. ГАРЕЕВ

СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРОПРОВОДА

Заводской паропровод на обеих площадках представляет собой сложную разветвлённую систему, включающую источник питания (отбор от промышленной ТЭЦ), узел редукции, разветвлённую сеть магистралей и потребители. Для эффективной модернизации паропровода необходимо знать его свойства. В статье приводятся результаты промышленного мониторинга, анализ статических и некоторых динамических характеристик. Паропровод; статические и динамические характеристики; модернизация

Модернизация паропровода, особенно в период структурной перестройки объединения, требует системного, взвешенного подхода. Помимо замены и ремонта устаревшего оборудования требуется принятие решений, определяющих эффективность функционирования паропровода в течение определённого периода времени. Для этого необходимо понимание особенностей протекающих в системе процессов, источников возможных затруднений, перспектив развития и т. п. Паропровод УМПО представляет собой типичную разветвлённую сеть с расходом по пути. Вместе с тем он имеет следующие характерные особенности:

- магистральный паропровод имеет значительную протяжённость и соответственно большой внутренний объём (на каждой площадке $V \approx 75 \text{ м}^3$), заполненный паром;
- на входе в паропровод первой площадки установлен пропорциональный регулятор давления, который по мере роста потребления и соответствующего снижения давления добавляет расход пара, пытаясь, таким образом, поддерживать давление постоянным (программа регулирования $P = \text{const}$; регулирующее воздействие — расход пара G). Вместе с тем регулятор имеет ручную пастройку по давлению так, что давление пара может изменяться как под действием потребления, так и оператором;
- на второй площадке регулятора нет, давление снижается до рабочего с помощью узла редукции;
- рабочее тело, пар, изменяет по пути температуру и фазовое состояние.

Паропровод представляет собой типичную распределённую систему с существенным изменением температуры и давления.

Это приводит к необходимости разработки сложной распределённой математической модели. Действительно, температура вдоль по тракту значительно уменьшается, что особенно заметно на второй площадке, которая удалена от территории ТЭЦ примерно на два километра. Ситуация на входе в этой площадке такова, что в процессе редукции температура падает примерно на 70 градусов (что намного больше ожидаемого адиабатного снижения температуры) и параметры пара оказываются на границе фазовых превращений.

Протяжённость внутризаводского паропроводов обеих площадок велика и это даёт основание ожидать существенного падения давления за счёт гидравлических потерь. Однако измерения, выполненные на обеих площадках, показали, что давления практически во всех точках магистралей паропроводов являются одинаковыми (различия давлений не превышают 5% и составляют $\sim 1,7\text{--}2 \text{ ата}$). Это означает, что паропровод можно с достаточной точностью считать полупроточным и существенно упростить математическое описание, ограничиваясь сосредоточенными параметрами.

Газодинамический расчёт и статические характеристики узла редукции

Основной задачей газодинамического расчёта является построение статических характеристик узла редукции.

Примем следующие допущения. Коэффициенты расходов дросселей одинаковы и неизменны; накоплением в объёме пренебрегаем; выделением жидкой фазы пренебрегаем; характеристики считаются для сверхкритических режимов на первом и втором дросселях и дросселе потребителя и докритическом режи-

ме для третьего дросселя; рабочее тело (пар) считается совершенным газом.

Обычно газодинамический расчёт проводят с использованием удобных газодинамических функций [1]. Так как эти функции построены для определённых значений коэффициента полнотропы, то расчёты получают приближёнными. Современные компьютерные технологии позволяют строить модели дозвукового истечения газа с непосредственным использованием формулы Сен-Венана [2]

$$G_1 = \mu f_1 p_0 \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT_0} \left[\left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (1)$$

а при надкритических перепадах использовать обычную формулу

$$G = \mu f_1 \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} p_0 \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT_0}}. \quad (2)$$

На рис. 1 показаны примеры расчётов по этим формулам.

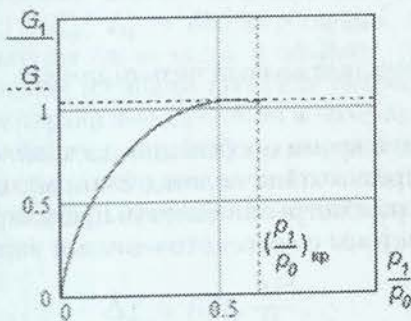
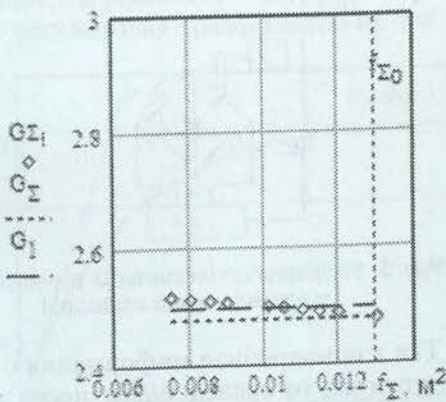


Рис. 1. Демонстрация использования формулы Сен-Венана



С учётом допущений математическая модель узла редукции имеет вид:

$$\begin{aligned} \mu m_{кр} \frac{p_0 f_1}{\sqrt{T_0}} &= \frac{\mu m_{кр} f_2 p_1}{\sqrt{T_1}}, \\ \frac{\mu m_{кр} f_2 p_1}{\sqrt{T_1}} &= \\ &= \mu f_3 p_2 \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT_2} \left[\left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \\ \mu f_3 p_2 \sqrt{\frac{2k}{(k+1)RT_2} \left[\left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} &= \\ &= \frac{\mu m_{кр} f_3 p_3}{\sqrt{T_3}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь принято, что на третьем дросселе отношение давлений является докритическим, а на других — сверхкритическим. Естественно, при изменении проходного сечения потребителя такая ситуация не останется неизменной: так, при открытии дросселя перепад и на третьем дросселе может оказаться сверхкритическим, а при закрытии, напротив, перепады будут уменьшаться. Следовательно, модель является справедливой в ограниченном диапазоне изменения потребления. Для того чтобы модель стала универсальной по отношению к потребителю, необходимо предусмотреть замену уравнений в соответствии с текущим значением отношений давлений. Практически это выливается в необходимость разработки весьма непростых алгоритмов и программ.

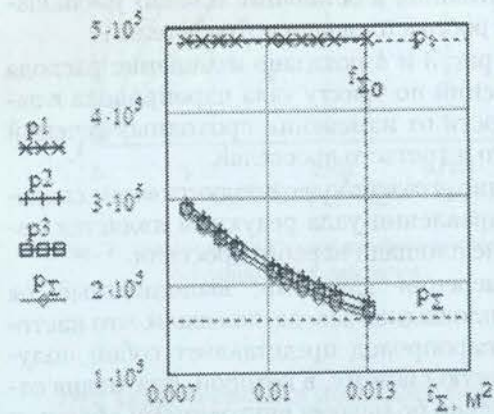


Рис. 2. Изменение расходов и давлений при изменении потребления пара

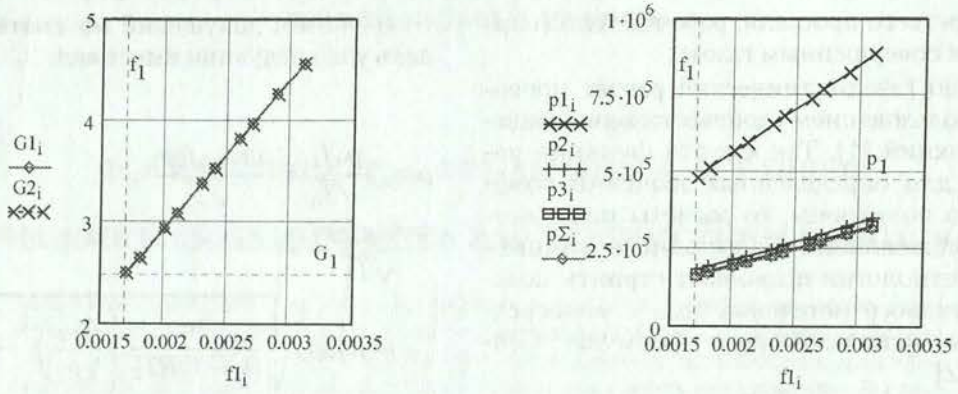


Рис. 3. Изменение расхода и давлений по тракту в зависимости от площади первого дросселя

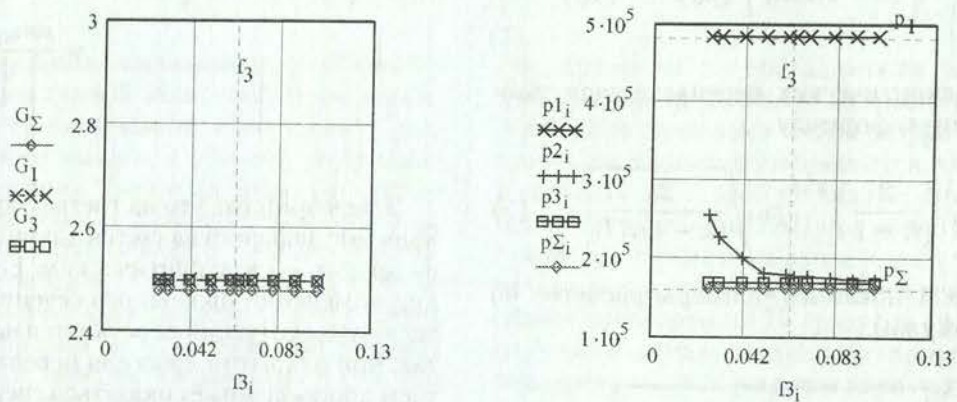


Рис. 4. Изменение расхода и давлений по тракту в зависимости от площади третьего дросселя

С использованием модели выполнен вычислительный эксперимент [3], по результатам которого построены статические характеристики узла редукции паропровода, представленные на рис. 2.

Расход пара, как и следовало ожидать, практически не зависит от потребления пара и определяется проходным сечением первого дросселя. Давление за первым дросселем также постоянно, а остальные плавно уменьшаются с ростом площади потребителя.

На рис. 3 и 4 показано изменение расхода и давлений по тракту узла паропровода в зависимости от изменения проходных сечений первого и третьего дросселей.

Видно, что наиболее продуктивным способом управления узла редукции является изменение площади первого дросселя.

Измерения давлений, выполненные на обеих площадках завода, показали, что настоящий паропровод представляет собой полупроточную систему, в которой, благодаря относительно большому внутреннему объёму и интенсивному подводу пара, давление, несмотря на потребление, остаётся примерно посто-

янным, а время пребывания каждой частицы пара чрезвычайно велико. Это даёт возможность рассмотрения системы регулирования как системы с сосредоточенными параметрами.

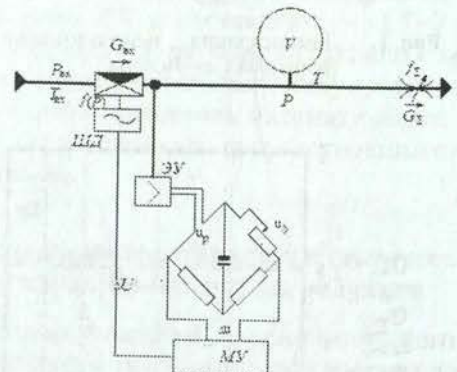


Рис. 5. Расчётная схема системы регулирования давления первой площадки

Так как подробная информация о системе отсутствует, то исследование носит характер идентификации, т. е. определение структуры и параметров регулятора на основе проведенных измерений параметров.

Ориентировочно система имеет вид, показанный на рис. 5. Здесь дроссель f_{Σ} играет роль коллективного потребителя, суммарный присоединённый объём паропровода V , регулятор, включающий датчик давления, электронный усилитель, потенциометр, магнитный усилитель, шаговый двигатель и регулирующий входной дроссель. Возможно, как и детали схемы не соответствуют действительности, но это в данном случае несущественно, так как поставлена задача качественного анализа системы и определения её самых общих свойств.

Динамика объекта регулирования в пульсовом приближении может быть описана обыкновенным дифференциальным уравнением вида

$$\mu m_{кр} \frac{P_{вх}^* (f_{вх0} - \Delta f_{вх})}{\sqrt{T_{вх}^*}} - \mu m_{кр} \frac{(P_0^* - \Delta P)(f_{\Sigma 0} - \Delta f_{\Sigma})}{\sqrt{T_0^*}} = \frac{V}{RT} \frac{dP}{dt}, \quad (4)$$

где μ — коэффициент расхода; $P_{вх}^*, P_0^*$ — соответственно, полные давления на входе и в объёме; $T_{вх}^*, T_0^*$ — соответственно, полные температуры на входе и в объёме; Δf_{Σ} — приращение площади дросселя потребления; ΔP — приращение давления в объёме. В первом приближении работу пропорционального регулятора можно представить в виде изменения площади проходного сечения входного дросселя

$$\Delta f = f_0 K_p \frac{\Delta P}{P_0}, \quad (5)$$

где K_p — коэффициент усиления регулятора. Решение системы уравнений при значении коэффициента усиления регулятора $K_p = 0$ (т. е. без регулятора) представлено на рис. 6.

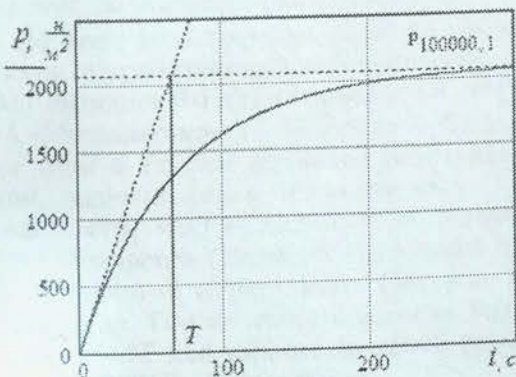


Рис. 6. Переходные процессы системы регулирования давления

Как и следовало ожидать, система регулирования оказалась весьма инерционной; время установления процесса ($\sim 3T$) составляет около трёх минут. Этим, кстати, можно объяснить примерное постоянство давлений по тракту паропровода, зафиксированное на обеих площадках. Подводя краткие итоги исследования динамики паропровода можно с уверенностью констатировать, что рассматриваемый паропровод является частично проточной системой и его регулирование может осуществляться простейшим дискретным регулятором — электронным дросселем.

Если в уравнении (4) устремить время к бесконечности, то, как известно, все производные стремятся к нулю и вместо дифференциального получается алгебраическое уравнение вида

$$\frac{P_{вх}^* f_0 (1 + K_p \frac{\Delta P}{P_0})}{\sqrt{T_{вх}^*}} = \frac{(P_0 + \Delta P)(f_0 - \Delta f)}{\sqrt{T_0^*}}. \quad (6)$$

Решение этого уравнения позволяет получить статические соотношения между параметрами (рис. 7), имеющими место по завершении переходного процесса.

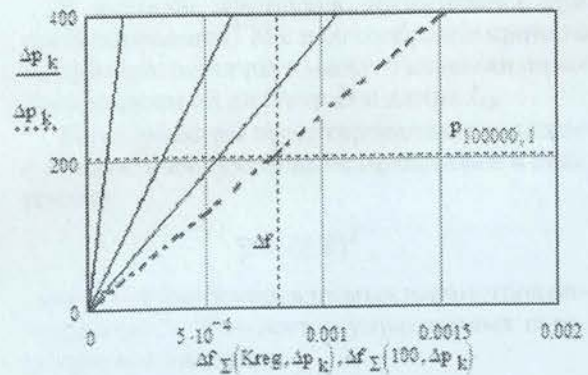


Рис. 7. Статическая характеристика системы регулирования давления

Эта характеристика позволяет определить статические ошибки системы при различных внешних воздействиях и коэффициенте усиления регулятора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абрамович, Г. Н.** Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович. М.: Машиностроение, 1976. 888 с.
2. **Герц, Е. С.** Пневматические устройства и системы в машиностроении: справочник / Е. С. Герц, А. И. Кудрявцев, О. В. Ложкин [и др.]; под общ. ред. Е. В. Герц. М.: Машиностроение, 1981. 408 с.
3. **Сунарчин, Р. А.** Выбор параметров гидромеханических регуляторов авиационных двигателей. Анализ и синтез гидромеханических регуляторов: учеб. пособие / Р. А. Сунарчин. Уфа: УГАТУ, 2005. 87 с.

ОБ АВТОРАХ



Бакиров Федор Гайфуллович, проф., зав. каф. теории авиац. и ракетн. двигателей. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1969). Д-р техн. наук по тепл. двиг. ЛА (УГАТУ, 1995). Иссл. в обл. авиадвигателестроения, тепловых двигателей и энергоустановок, проблем энергосбережения.



Сунарчин Роберт Авалевич, доц. каф. прикл. гидромеханики. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1962). Канд. техн. наук по двигателям ЛА (МАИ, 1971). Иссл. в обл. автоматич. регулирования авиац. двигателей.

Гареев Гаяз Фанзельевич, зам. гл. энергетика УМНПО.