

К ЭВРИСТИЧЕСКИМ МЕТОДАМ АНАЛИЗА ОДНОРАЗМЕРНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЗВЕТВЛЕННЫХ СИСТЕМАХ МАГИСТРАЛЕЙ, ЗАПОЛНЕННЫХ ТЕКУЩЕЙ БАРОТРОПНОЙ ЖИДКОСТЬЮ

Еланчик Ф. И.

Настоящая статья является продолжением статьи [1]. В упомянутой статье показаны преимущества волнового задания дифференциальных уравнений и краевых условий. Однако система приближенных методов расчета, основанная на описанных свойствах, неполна и не позволяет решающим образом упростить процедуру исследования сетей магистралей сложной формы с произвольным распределением гидравлического сопротивления, удовлетворяющего нестационарным характеристикам.

В данной статье показывается, что, хотя требования корректности по Адамару не могут быть приложены к волновому заданию уравнений и краевых условий (поскольку физический процесс может быть неустойчивым), это задание всегда оказывается корректным в некотором специальном смысле, что позволяет применять методы, предназначенные для описания устойчивых движений.

Показываются методы расчета, эффективность которых определяется общими свойствами физических процессов и создаваемых человеком конструкций. Показывается способ оценки такого общего свойства - пассивности физических процессов. Как и в [1] считаем движение жидкости дозвуковым, $M \ll 1$. Согласно статье [1] волновое задание уравнений и краевых условий в рассматриваемых магистральных выполняется путем:

а) перехода к волновым переменным

$$p' = \frac{p - p_0 + \rho a v}{2}; \quad p'' = \frac{p - p_0 - \rho a v}{2},$$

представляющим суммарные характеристики акустических волн, распространяющихся в различных направлениях.

б) разделения разветвленной системы магистралей "удобным" (зависящим от метода) образом на части, представляющие собой либо последовательные соединения участков с различными параметрами, либо места разветвления;

в) задания для каждого из внутренних участков краевых условий в виде "входящих" волн и постановки задачи определения "выходящих" волн через "входящие";

г) постановки задачи определения волн "входящих" в систему через "выходящие" волны и задаваемые в практическом случае краевые условия сопряжения "входящих" и "выходящих" волн для различных участков и замыкания описания разветвленной системы.

1. Рассмотрим множество автомодельных процессов, каждый из которых характеризуется семейством характеристик $x[x(0),t]$ и параметром $Q[x,t]$, имеющим инвариантные свойства на каждой из характеристик.

Определение 1. Автомодельные процессы назовем динамически независимыми, если каждые две характеристики, относящиеся к разным процессам, пересекаются не более чем в конечном ограниченном множестве точек, и если при этом на различных характеристиках инвариантные свойства могут быть заданы независимо друг от друга.

Определение 2. Преобразования автомодельных процессов называются динамически независимыми, если они вызваны реализацией независимых автомодельных процессов или если реализуются в различных разделенные моменты времени.

Предложение 1. Автомодельные процессы распространения волн в участках магистралей малой длины, соответствующие разным направлениям распространения и (или) разным моментам времени являются динамически независимыми.

Определение 3. Две последовательности множеств физических процессов, бесконечно мало отличающихся от автомодельных процессов, динамически независимых друг от друга, назовем почти динамически независимыми.

Предложение 2. Динамические процессы, вызванные поступлением волн разного направления в бесконечно малый по длине отрезок жидкостной магистрали, являются почти динамически независимыми, при этом существует запаздывание во времени выходящих волн по отношению к входящим.

Значение свойства динамической независимости процессов состоит в том, что величины отдельных коэффициентов, применяемых в расчетных процедурах при анализе таких процессов, соответствуют фундаментальным физическим свойствам среды, глобальным свойствам решений. Это ведет к непосредственному упрощению решения некоторых задач; в других случаях области эффективности определенных математических методов совпадают с актуальными, практически реализуемыми областями вариантов постановок задач.

2. Возможности построения рациональных методик анализа широкого класса задач связаны с корректностью их постановки. Как известно, понятие корректности постановки задачи, например, по Адамару, включает наряду с требованиями существования, непрерывности по параметрам и единственности решения уравнений еще и требование устойчивости по Ляпунову и устойчивости по параметрам. Однако наличие неустойчивого решения не всегда "грех" математической постановки задачи, тем более что в составных системах переход к корректной постановке задачи не может быть обеспечен волновым заданием уравнений и

краевых условий, т.е. заданием локальных свойств постановки задачи. Поэтому рассмотрим свойства данной постановки задачи, связанные с частичной реализацией свойства корректности и определяющие рациональные формы анализа.

Определение 4. Пусть некоторая задача определена на непрерывном множестве исходных данных, относящихся к области пространства, переменным значениям времени и альтернативным вариантам задания параметров и граничных значений неизвестных. Пусть эти граничные значения заданы в некоторой подобласти пространства – времени, имеющей размерность, пониженную на единицу по сравнению с общей размерностью пространства - времени. Назовем постановку задачи локально-корректной (обладающей локальной корректностью) в окрестности некоторых заданных исходных параметров, если результаты операций по ее решению все существуют и сохраняют свойства корректности, т.е. равномерной непрерывности единственного решения, по крайней мере, в некоторой окрестности пространственно - временной подобласти граничных значений неизвестных и выбранных значений параметров.

Определение 5. Будем говорить, что постановка задачи обладает глобальной корректностью относительно параметра t , если она локально корректна и свойства корректности сохраняются во всей открытой области значений параметра t .

Определение 6. Будем говорить, что постановка задачи обладает равномерной пространственно-элементарной корректностью, если при разбиении системы на пространственные элементы, соответствующие этой постановке, для каждого элемента, взятого в отдельности, данная постановка сводится к постановке задачи, обладающей глобальной корректностью относительно времени, причем последнее свойство не зависит от формы изменения во времени вводимых в элемент возмущений.

Определение 7. Будем говорить, что постановка задачи обладает обобщенной корректностью m -того порядка одного из указанных видов по отношению к неизвестной функции $f[x,t]$, если условия корректности данного вида, указанные для функций $f[x,t]$, выполняются для функции $J_m(x,t)$ (где J_m m - кратный интеграл по времени t от функции $|f(x,t)|$) со следующей поправкой: бесконечно малому изменению предельных данных и параметров отвечает бесконечно малое изменение функции J не обязательно при постоянном t , но при хотя бы каком-нибудь бесконечно малом изменении t .

Определение 8. Будем говорить, что постановка задачи обладает симметрично-элементарной глобальной корректностью, если она обладает равномерной пространственно-элементарной корректностью во всей заданной области пространства и альтернативных заданий параметров и предельных заданий неизвестных, если условия равномерной непрерывности выполнены не только для времени, но и для всех парамет-

ров, изменяющихся в данной области, причем, в силу физического описания задачи, координаты, в которых описывается данная область, изменяются независимо друг от друга, а сама область ограничена координатными поверхностями, и если в той же области условиям корректности отвечают операции по вычислению решения задачи.

Предложение 3. Волновое задание уравнений и граничных условий для уравнений (1) (см. [1]) обладает локальной корректностью при любых заданных конечных кусочно-непрерывных параметрах и предельных значениях неизвестных.

Предложение 4. При условиях предложения 4 волновое задание уравнений и граничных условий обладает равномерной пространственно-элементарной корректностью.

Замечание 1. Исходя из уравнений (1) (см. [1]) можно показать, что элементарная явная разностная процедура решения этих уравнений не обладает равномерной пространственно-элементарной корректностью и вообще глобальной корректностью относительно времени.

Известные аналитико-топологические методы четырехполосников, направленных графов, не связанные с заменой переменных в уравнениях (1) (см. [1]), не обладают локальной корректностью, по крайней мере, в окрестности некоторых частот малых колебаний либо некоторых сочетаний начальных и краевых условий, а потому не обладают симметрично-элементарной глобальной корректностью.

Замечание 2. Свойства процессов, выражаемые определениями 4-6, 8 используются как дополняющие свойство взаимной динамической независимости автомодельных процессов при формировании характеристик систем по характеристикам отдельных частей. Свойство, выражаемое определением 7, применяется для распространения понятия корректности на описание воздействия кратковременных импульсов.

3. Рассмотрим общий класс ситуаций, в которых свойства процессов как затухающих позволяют ограничивать число рассматриваемых отдельно последовательных отражений волн, несмотря на существенную величину отраженных волн. К такому классу относятся ситуации квазистационарной зависимости гидравлического сопротивления от скорости течения.

В таких магистралях при каждом взаимодействии волн с гидравлическими сопротивлениями уменьшается следующий функционал:

$$L = \int_0^{l_1} \left[\left(\frac{\partial p'}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial p''}{\partial t} \right)^2 \right] S dx.$$

Этот функционал не увеличивается при взаимодействии волн с местами изменения сечения магистрали. Если при $t > 0$ в магистраль не поступают новые внешние волны, то данный функционал уменьшается

также за счет сложения знакопеременных составляющих волн и за счет рассеяния волн за пределы рассматриваемого отрезка магистрали. Функционал L играет роль функции Ляпунова для процессов в магистрали. Эти процессы являются асимптотически устойчивыми, а волновое задание уравнений и граничных условий обладает в этом случае симметрично-элементарной глобальной корректностью.

В частном случае функционал L в момент $t = 0$ характеризует "пакет" волн, входящих в рассматриваемый участок магистрали. Существенному уменьшению функционала соответствует гашение волн в магистрали. Поскольку это гашение совмещается как с отражением, так и с пропусканием волн, как пропущенные, так и отраженные волны оказываются тем более слабее падающих волн. Практические методы анализа процессов в условиях сильного отражения волн могут быть основаны на этом обстоятельстве, а также на технологических ограничениях сложности конструкций магистралей. В результате количество сечений магистралей, в которых рассматривается преобразование волн, может быть ограничено. Такие методы относительно легко строятся для описания процессов, характеризующихся относительно небольшими длинами волн, соизмеримыми с размерами фрагментов сложной конструкции магистрали. Это - методы учета малой "прозрачности" магистралей, последовательно "сращивания" характеристик соединяемых магистралей.

4. В случае, когда длина рассматриваемых волн велика по сравнению с размерами фрагментов магистралей, применяется специальный асимптотический метод. Для определенности рассмотрим случай квазистационарных зависимостей гидравлического сопротивления от скорости жидкости.

Пусть $x_i = l_i \tilde{x}_i$, тогда уравнения (5) (см. [1]) принимают вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial p'}{\partial \tilde{x}_i} \right) = \frac{\partial p'}{\partial t} \tilde{\varphi}^- + \frac{\partial p''}{\partial t} \tilde{f}^+ - \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} \cdot \frac{l_i}{a} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial p''}{\partial \tilde{x}_i} \right) = -\frac{\partial p''}{\partial t} \tilde{\varphi}^+ - \frac{\partial p'}{\partial t} \tilde{f}^- + \frac{\partial^2 p''}{\partial t^2} \cdot \frac{l_i}{a}.$$

Задавшись характерным временем T , например, периодом колебаний или временем монотонного процесса, строим решение уравнений в

виде ряда по степеням параметра $\varepsilon = \frac{l_i}{aT}$

$$p' = p'_{(0)} + p'_{(1)}\varepsilon + p'_{(2)}\varepsilon^2 + \dots$$

$$p'' = p''_{(0)} + p''_{(1)}\varepsilon + p''_{(2)}\varepsilon^2 + \dots$$

Функции $P'_{(0)}, P''_{(0)}$ определяются из статических соотношений, связывающих эти функции с функциями $p'(0,t), p''(l,t)$. Для определения функций $P'_{(1)}, P''_{(1)}$ следует использовать общее выражение

$$p'(\tilde{x}_i + \Delta\tilde{x}) - p'(\tilde{x}_i) \approx \left(\frac{\partial p'_{(0)}}{\partial \tilde{x}_i} \right) \cdot \Delta\tilde{x} - \left(\frac{\partial p'_{(0)}}{\partial t} \right) \cdot \frac{1_i}{a} \Delta\tilde{x}, \quad (2)$$

где $\Delta\tilde{x}$ - малая добавка величины \tilde{x}_i .

Величина $-\left(\frac{\partial p'_{(0)}}{\partial t} \right) \cdot \frac{1_i}{a} \Delta\tilde{x}$, пропорциональная малому параметру ϵ , может рассматриваться как возмущение параметра p' , действующее

на систему в данном сечении \tilde{x}_i . Аналогично величина $\left(\frac{\partial p''_{(0)}}{\partial t} \right) \cdot \frac{1_i}{a} \Delta\tilde{x}$

рассматривается как возмущение параметра p'' . Реакция на возмущение строится по статическим характеристикам. Для получения коэффициентов $P'_{(1)}, P''_{(1)}$ достаточно далее проинтегрировать полученные результаты по \tilde{x} от 0 до 1. По результатам вычисления коэффициентов $P'_{(1)}\left(1, \frac{t}{T}\right), P''_{(1)}\left(0, \frac{t}{T}\right)$ могут быть вычислены конструктивные парамет-

ры магистрали, имеющей статические и динамические характеристики данной магистрали по отношению к внешним низкочастотным возмущениям и простейшую возможную конструкцию ("приведенная магистраль"). Если параметр $\zeta(x_i)$ вместе с изменением стационарного режима течения в магистрали меняется согласно закону автомодельности $\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} \right) = 0$ (что бывает при сохранении в магистрали ламинарного

либо развитого турбулентного потоков), то приведенная и исходная магистрали должны иметь общими следующие параметры.

Статические параметры режима: $G(0,t) = v(0,t) \cdot s(0)$; $\Delta p = p(0,t) - p(l,t)$.

Динамические параметры конструкции:

$$J_1 = \int_0^{l_i} \frac{dx_i}{s}; J_2 = \int_0^{l_i} s dx_i; \quad (3)$$

$$J_3 = \int_0^{l_i} \Theta s dx_i; J_4 = \int_0^{l_i} \Theta^2 s dx_i,$$

где $\theta = \frac{p(0) - p(x_i)}{p(0) - p(l_i)}$, причем значения параметров p предполагаются

соответствующими стационарному режиму течения.

В соответствии с формулами (3) приведенная магистраль может иметь постоянную площадь поперечного сечения и содержать не более двух сечений, в которых срабатывает гидравлическое сопротивление. Расположение одного из этих сечений может быть выбрано произвольно внутри приведенной магистрали. Исходя из принципа минимальной сложности конструкции это расположение следует выбирать совпадающим с одним из концов приведенной магистрали. Однако могут быть применены и другие принципы. Например, при учете ненулевых начальных условий течения следует иметь в виду существование "временных" источников и стоков и отображать их совмещение в пространстве с гидравлическими сопротивлениями. Если функции θ меняются в ходе процесса или гидравлические сопротивления связаны со скоростью потока нестационарными зависимостями, то параметры приведенной магистрали следует считать переменными во времени, однако построение такой магистрали остается возможным в силу малости времени акустических процессов в ней. В этом случае местоположение одного из гидравлических сопротивлений можно подбирать согласно условию наименьшего изменения местоположения другого сопротивления при малом изменении режима течения жидкости.

Совместное применение методов учета малой прозрачности магистрали сложной конструкции по отношению к коротким волнам, метода расчета характеристик сложной магистрали по характеристикам составляющих магистралей, метода учета малости изменений параметров в отраженных волнах и метода упрощения конструкции магистрали при длинноволновых процессах приводит к ограничению числа необходимых операций при исследовании нестационарных процессов в магистралях весьма разнообразной конструкции.

Пример. Пусть исследуется влияние местоположения гидравлического сопротивления в магистрали подачи реагента на пульсации давления продукта химической реакции. Магистраль подачи представляет собой последовательное соединение трубопровода и коллектора (из которого реагент непосредственно попадает к месту реакции).

Трубопровод и коллектор весьма отличаются друг от друга по площади поперечного сечения, так что по отношению к коротким волнам, поступающим из коллектора в трубопровод, отражающимся внутри трубопровода и поступающим в коллектор, система обладает пренебрежимо малой прозрачностью. В этом случае влияние расположения гидравлического сопротивления проявляется лишь при таких достаточно низких частотах колебаний, при которых площадь поперечного сечения приведенной магистрали, построенной вместо коллектора и близлежащего участка трубопровода, имеет порядок площади поперечного сечения трубопровода. В этом случае длина звуковой волны не менее чем на порядок превышает длину участка потока в коллекторе.

Список литературы

- 1 Еланчик Ф.И. Эвристические методы анализа одномерных нестационарных процессов в разветвленных системах магистралей / Сборник статей "Динамические процессы в силовых и энергетических установках". - Самара: СГАУ, 1994. - С. 80-87
- 2 Гликман Б.Ф. Автоматическое регулирование жидкостных ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1989. - 296 с.
- 3 Самойлович Г.С. Гидрогазодинамика. М.: Машиностроение, 1990. - 384 с.
- 4 Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М.: Недра, 1975. - 296 с.
- 5 Шорин В.П. Устранение колебаний в авиационных трубопроводах. М.: Машиностроение, 1980. - 150 с.

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ГТД НА БАЗЕ НЕЙРО-НЕЧЕТКОЙ ЭС РВ

Жернаков С.В.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Одним из перспективных способов повышения эффективности функционирования систем технического контроля и диагностики ГТД является применение комплексных интеллектуальных компьютерных технологий, а именно, систем, основанных на разнородных знаниях - гибридных экспертных системах реального времени (ЭС РВ) [6-9,12,13,15].