

МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛН КОНЕЧНОЙ АМПЛИТУДЫ С РАЗВЕТВЛЕНИЕМ КАНАЛА

А.А. Черноусов

Предложена модель для расчета взаимодействия нестационарного потока в трубопроводе с местом разветвления канала. Модель основана на обобщении одномерной задачи о распаде разрыва и использует в качестве замыкающего соотношения многопараметрическую зависимость – нестационарную гидродинамическую характеристику элемента-связи типа «тройник».

Показана хорошая достоверность результатов расчета по предложенной модели в рамках одномерного приближения на примере расчета волнового течения в трубопроводе экспериментальной установки.

Расчеты неустановившихся течений газов и жидкостей в трубопроводах требуют корректного задания условий на внутренних граничных элементах (местных сопротивлений – МС). При численном расчете течения на граничном элементе, связывающем два канала или объем с каналом, с успехом применяется модель МС, основанная на обобщении задач о распаде произвольного (газодинамического) разрыва (РПР). Такие модели используют статическую характеристику потерь полного давления традиционного для гидравлики вида и применяются для имитационного моделирования течений в газоздушных трактах тепловых двигателей: ДВС, ПуВРД и др.

В случае более сложных элементов, например, в месте разветвления трубопровода («тройники»), проблематично как получение гидрогазодинамической характеристики элемента на всевозможных режимах течения (в обобщенных переменных), так и надежное включение ее в методику решения задачи о РПР на граничном элементе такого типа, где для расчета течения требуется еще и выбрать единственно возможный режим течения из многих.

Например, не вполне адекватные результаты расчета течения на разветвлении дает применение коэффициентов гидравлических потерь. Такие коэффициенты, полученные в виде постоянных, или, возможно, функций числа M в одном из каналов, не могут служить основой описания соотношения расходов при слиянии или разделении потоков в месте разветвления и для «замыкания» задачи требуются дополнительные гипотезы, такие как допущение о равенстве статических давлений в примыкающих сечениях двух или всех трех каналов [1, 4].

Требуется более «простая в обращении» методика, использующая обобщенную

«замыкающую» зависимость для параметров стационарного течения сжимаемого газа в месте разветвления – например, основанная на информации о течении при распаде разрыва на тройнике.

Вычислительными экспериментами (собственными, а также в работах других авторов [2–5]) в достаточно простой пространственной постановке показано, что достоверность расчета движения волн конечной амплитуды (ВКА) в разветвленных трубопроводах может быть удовлетворительной при применении такого подхода.

Под влиянием указанных работ автором изучалась возможность создания модели разветвления канала для расчета нестационарного течения в одномерном приближении, с использованием характеристики отклика элемента в месте разветвления трубопровода в нестационарном потоке.

Модель, предназначенная для расчета мгновенных потоков массы, импульса и энергии через элемент-разветвление («тройник») на расчетном шаге, строится следующим образом. Параметры однородного потока в сечениях каналов на разветвлении определяются расчетом течения при РПР на тройнике, с учетом всех возможных режимов дозвукового течения.

На рис. 1 показана *обобщенная* расчетная схема течения при РПР, с тремя фиктивными контактными поверхностями (КП). Схема покрывает все шесть возможных режимов течения при РПР, когда тройник может являться либо вытяжным, либо приточным со стороны одного из трех каналов, соответственно с одной и с двумя контактными поверхностями. Возможны предельные («тривиальные») режимы течения при РПР, когда на входе в один или более каналов устанавливается нулевой или близкий к нулевому расход G .

МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛН КОНЕЧНОЙ АМПЛИТУДЫ С РАЗВЕТВЛЕНИЕМ КАНАЛА

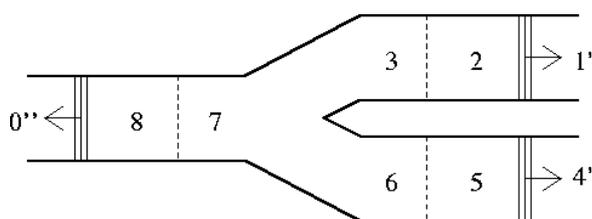


Рис. 1

Исходными данными задачи об РПР на расчетном шаге являются термогазодинамические параметры в зонах 0'', 1' и 4' (с концов каналов). Скорость потока в этих зонах исключается из рассмотрения пересчетом термодинамических параметров к нестационарно заторможенным (поэтому зоны течения 0'', 1' и 4' отмечены штрихами, см. [1]). Вместо стационарной характеристики потерь в потоке на разветвлении модель использует пару зависимостей вида:

$$\begin{aligned} \bar{p}_2 &= \bar{p}_2(\bar{p}_1', \bar{p}_4', \bar{T}_1', \bar{T}_4'), \\ \bar{p}_5 &= \bar{p}_5(\bar{p}_1', \bar{p}_4', \bar{T}_1', \bar{T}_4'), \end{aligned} \quad (1)$$

рассматриваемых как *нестационарную гидрогазодинамическую характеристику* (НГХ) разветвления. Данная зависимость для искомых безразмерных значений давления:

$$\bar{p}_2 = \frac{p_2 - p_0''}{p_0''} \quad \text{и} \quad \bar{p}_5 = \frac{p_5 - p_0''}{p_0''}$$

может интерполироваться по таблице, заполненной по результатам решения большой серии задач о РПР с варьированием всех четырех входящих в (1) безразмерных факторов:

$$\bar{p}_1' = \frac{p_1' - p_0''}{p_0''}, \quad \bar{p}_4' = \frac{p_4' - p_0''}{p_0''},$$

$$\bar{T}_1' = \frac{T_1' - T_0''}{T_0''}, \quad \bar{T}_4' = \frac{T_4' - T_0''}{T_0''},$$

полностью (вместе с геометрией элемента и свойствами газовой смеси) определяющих решение задач о РПР в некотором диапазоне изменения входных параметров (1).

Располагая подобной зависимостью, можно решать задачу о РПР на шаге в одномерном расчете. Покажем последовательность решения на примере некоторого режима течения, вытяжного со стороны канала 4' (рис. 2), как наиболее сложного (содержащего слияние потоков). Более простые решения задачи о РПР на тройнике при наличии связи вида (1) строятся совершенно аналогично.

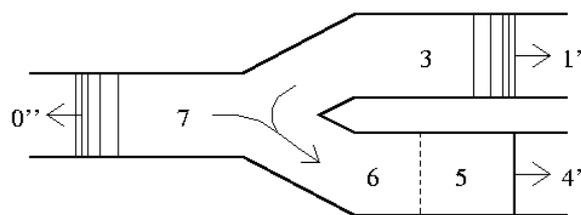


Рис. 2

Расчет РПР часто должен учитывать влияние состава газовой смеси, получающейся при слиянии потоков. Для калорически совершенных идеальных газов примем в расчетной схеме уравнения состояния компонентов в виде $p_k = \rho_k R_k T$ и $e_k(T) = c_{vk} T$. Зная $p_3 = p_2$ из (1), определим M_3 из равенства $p_3 = p_1' \pi'(M_3)$, а затем – другие параметры потока в зоне 3, в том числе расход G_3 и энтальпию торможения i_3^* . Считая простую волну, разделяющую зоны 5 и 4' изоэнтропной волной сжатия и зная p_5 из (1), можем определить M_5 из $p_5 = p_4' \pi'(M_5)$ и затем – скорость $u_5 = u_6$ в обеих зонах, разделенных контактной поверхностью. Состав и параметры газа в зоне 6 определяется расчетом слияния потоков из зон 3 и 7 при полном перемешивании с сохранением массы и энергии. Температура стационарного торможения в зоне 7 T_7^* определяется из уравнения сохранения энергии в потоке:

$$T_7^* = \frac{G_3 c_{p3} T_3^* + G_6 c_{p6} T_6^*}{G_7 c_{p7}}.$$

Расчет параметров потока в зонах 3, 6 и 7 ведется итерационно по числу M_7 . Прекращение итераций – по условию равенства расходов $G_7 = G_3 + G_6$, где G_7 берется из уравнения расхода:

$$G_7 = m \frac{q(M_7) F_0 p_0'' \pi''(M_7)}{\pi(M_7) \sqrt{T_7^*}}.$$

Данная модель прошла проверку вычислительными экспериментами, в которых сравнивались результаты расчетов в двумерных и трехмерных полостях с расчетами в одномерном приближении, в которых использовались характеристики описанного выше вида.

Экспериментальная проверка предложенной модели проводилась сравнением записи датчика давления в протяженном трубопроводе с разветвлением экспериментальной одноцикловой установки, с результатами численного моделирования процесса движе-

ния ВКА в нем в одномерном приближении. На рис. 3. и 4 представлены общий вид и эскиз трубопровода установки в четырех конструктивных вариантах – с длинным и коротким патрубком после разветвления, с открытым и закрытым концом.



Рис.3

Разветвленный трубопровод содержал Т-образный тройник, диаметр трубопроводов составлял около 25 мм, длины труб – $l_1 \approx 2400$ мм, $l_2 \approx l_3 \approx 2700$ мм, $l'_2 \approx 320$ мм. Действительные размеры труб, параметры в атмосфере лаборатории были заложены в расчетную модель. Расчеты проводились для интервала в 0,2 с модельного времени, шаг по времени – 0,01 мс.

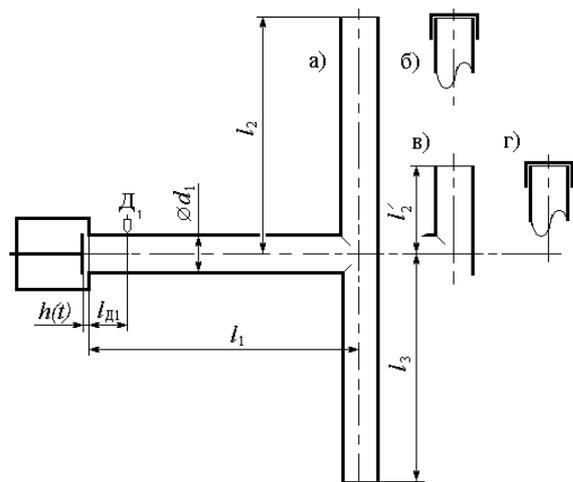


Рис.4

При проведении экспериментов исходная ВКА разрежения генерировалась кратковременным сообщением начального участка трубопровода с вакуумированной емкостью. При проведении расчета подбирался закон его открытия для точного воспроизведения расчетом исходной ВКА разрежения. Изуча-

лось расхождение кривых давления на датчике (расположенном вблизи емкости) в расчете и эксперименте.

Характеристика тройника была получена расчетом серии РГР для плоской расчетной области с Т-образным тройником, с углом 90° (рис. 5). Расчет двумерного течения по уравнениям газовой динамики выполнялся консервативной монотонной схемой типа Годунова повышенного порядка аппроксимации по x и y пространственным координатам и второго порядка по времени t .



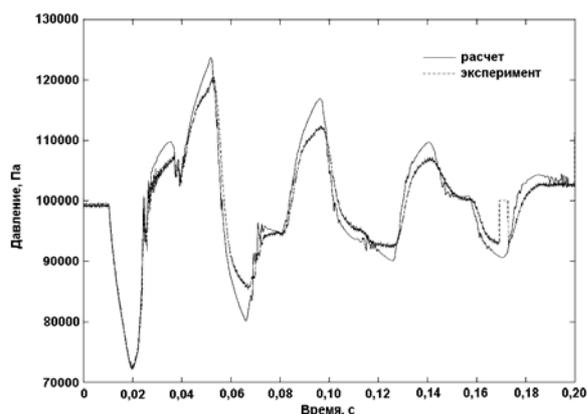
Рис. 5

На рис. 6 а) – г) представлены полученные в расчете и в эксперименте зависимости величины давления на датчике D_1 (рис. 4) от времени, соответствующие всем четырем вариантам конструктивного исполнения трубопровода (рис. 4). Как можно видеть из рис. 6, качество моделирования процесса в трубе без разветвления можно признать удовлетворительным. Имеются заметные погрешности определения амплитуд волн.

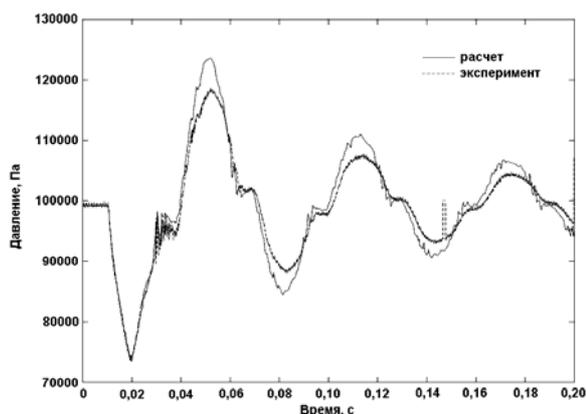
При этом следует иметь в виду, что в отсутствие разветвления амплитуда первой отраженной волны в опытах превышает амплитуду исходной; при закрытом конце в месте расположения тройника знаки исходной и отраженной волн одинаковы, при открытом конце первая отраженная волна является волной сжатия. В свете этого погрешность воспроизведения расчетом давления в первой отраженной волне можно оценить величиной примерно 7-8%.

Наблюдаемые погрешности не удается устранить ни уменьшением интервалов варьирования при проведении серии расчетов по определению НГХ тройника, ни дроблением как двумерной сетки в этих расчетах, так и расчетной сетки в расчете волнового процесса.

МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛН КОНЕЧНОЙ АМПЛИТУДЫ С РАЗВЕТВЛЕНИЕМ КАНАЛА

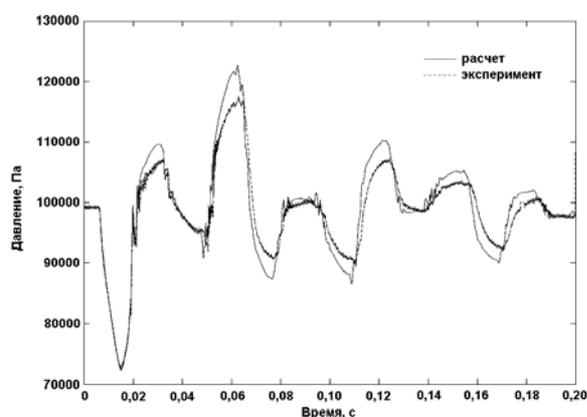


а)

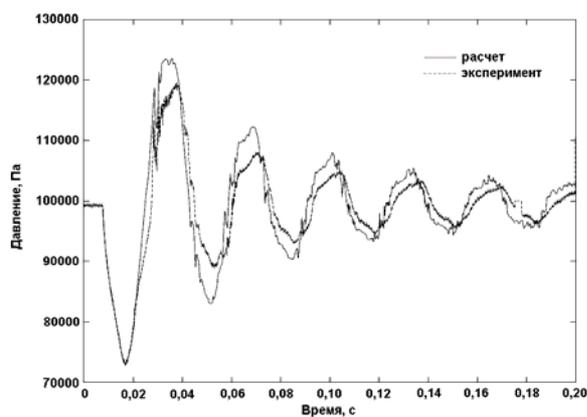


г)

Рис. 6



б)



в)

Погрешности, скорее всего, вызваны применением НГХ, полученной для плоской конфигурации тройника (для устранения таких погрешностей следовало бы вывести расчеты НГХ тройников в пространственной постановке). Также, предположительно, сыграла свою роль неучтенная неравномерность распределения параметров потока по сечению каналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рудой Б.П. Прикладная нестационарная гидродинамика: Учебное пособие. – Уфа: Изд-во УАИ, 1988. – 184 с.
2. Яушев И.К., Черешнев А.П. К задаче о распаде разрыва в разветвленных каналах. // В сб. «Численные методы механики сплошной среды». – 1971. – Т. 2. – № 2. – Новосибирск: Изд-во ВЦ СО АН СССР.
3. Яушев И.К. Численный расчет и приближенное описание задачи о распаде разрыва в разветвленных каналах // В сб.: «Аэромеханика». – М.: Наука, 1976. – С. 283-288.
4. Яушев И.К. Распад произвольного разрыва в разветвленных каналах // В сб. «Численные методы механики сплошной среды». – 1972. – Т. 3. – № 3. – Новосибирск: Изд-во ВЦ СО АН СССР.
5. Multi-Dimensional Wave Propagation In Pipe Junctions / R.J. Pearson, M.D. Bassett, P. Basten and other// SAE Paper. – 1999-01-1186. –14 p.
6. Bassett M.D., Winterbone D.E., Pearson R.J. Calculation of steady flow pressure loss coefficients for pipe junctions // Proc. Inst. Mech. Eng., Part C: J. Mech. Eng. Science. – v. 215. – 2001. – P. 861-881.