

Численное исследование динамики предохранительного клапана

Томас Редер,
соиск.,

ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, г. Ижевск

Рассматриваются вопросы построения математической модели процесса срабатывания пружинного предохранительного клапана прямого действия, в том числе и вопросы обоснования физически корректной величины начального подъема диска при решении сопряженной задачи о движении диска в рабочем объеме клапана для газовых сред.

Математическое моделирование проводится на основе фундаментальной системы дифференциальных уравнений движения вязкого сжимаемого газа, совместно с уравнением движения диска. Задача решалась на основе метода Курганова-Тадмора, реализованного в рамках open source пакета OpenFOAM. В результате проведенных расчетов была получена и сопоставлена с экспериментальными данными зависимость высоты подъема диска от времени.

The conjugate problem of disk movement into gas-filled volume of the spring-type safety valve is solved. The questions of determining the physically correct value of the disk initial lift are considered. The mathematical modeling is performed on base the fundamental system of differential equations for viscous gas movement with the equation for displacement of disk valve. The solution of this problem is carried out numerically using the the Kurganov-Tadmor method. The dependence of the disk displacement on time was obtained and compared with the experimental data.

Рассматриваются процессы, протекающие в предохранительном клапане пружинного типа при его срабатывании [1]. В начальный момент клапан закрыт, давление в клапане ниже диска равно давлению в резервуаре, а давление выше диска соответствует давлению окружающей среды. При достижении определенного критического значения диск начинает подниматься. Дальнейший характер динамического процесса, протекающего в рассматриваемой системе, определяется рядом таких параметров, как термодинамические параметры газа в резервуаре, характеристики материала пружины и ее предварительное натяжение. Движение диска определяется как динамикой газа, так и реакцией пружины. Процесс открытия клапана сопровождается стравливанием избыточного давления из резервуара. Постепенное падение давления в резервуаре приводит к закрытию клапана под действием упругих сил пружины.

В общем случае, клапан можно, без потери точности и с соблюдением физической достоверности, заменить на эквивалентную осесимметричную область (рис.1). Физическая область Ω разделена на части, занимаемые газом $\Omega_g(t)$ и диском $\Omega_s(t)$ так, что $\Omega(t) = \Omega_g(t) \cup \Omega_s(t)$. Граница раздела $\Omega_{move} = f(t)$ между $\Omega_s(t)$ и $\Omega_g(t)$ в каждый момент времени определяется как $\Omega_{move} = \Omega_s(t) \cap \Omega_g(t)$.

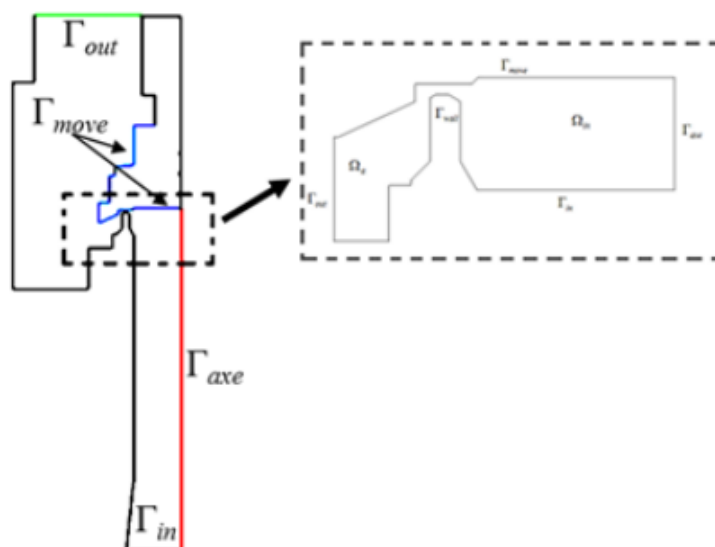


рис. 1 Схема расчётной области в осесимметричной постановке с границами:

Γ_{in} - вход, Γ_{out} - выход, Γ_{axe} - ось симметрии, Γ_{move} - подвижная граница (контур подвижной части клапана)

Для изучения процессов, протекающих в клапане, воспользуемся математической моделью в виде системы дифференциальных уравнений, описывающих изменение параметров среды во внутреннем объеме клапана и движения диска. Так как рассматривается газовый предохранительный клапан, то процессы внутренней газодинамики будут рассматриваться в рамках модели вязкого сжимаемого газа. Подробная математическая постановка задачи рассматривается в работах [1,2].

В качестве рабочего тела рассматривается воздух. В начальный момент времени задается следующее распределение давления: перед зазором $p_{in} = 0.95$ МПа, за зазором - атмосферное давление ($p_a = 0.1$ МПа). Газ в начальный момент времени неподвижен, температура равна 293 К. Используются граничные условия:

- Γ_{in} : величина полного давления 0.95 МПа;
- Γ_{axe} : условие симметрии;
- Γ_{out} : неотражающее граничное условие;
- Γ_{wall} : условие прилипания;
- Γ_{move} : условие перемещения границы.

Поставленная таким образом сопряженная задача динамики диска на упругом подвесе и механики газа будет решаться в жёстко связанной постановке с использованием стандартных моделей открытого пакета OpenFOAM [3].

Рассматривается задача о начальных моментах работы предохранительного клапана при резком повышении давления. Сопоставляются процессы, протекающие в клапане, при начальной величине подъема диска (высота зазора в начальный момент времени) 1 мкм (вязкая постановка) и 0.1 мм (невязкая постановка). Величина начального зазора может повлиять на последующую динамику движения клапана. В работе [4] расчет динамики клапана проводился при начальном подъеме клапана на 1 мм.

В результате расчетов (рабочая область рис.1) был определен ход диска (рис. 2). При такой величине зазора область движения газа включает в себя значительную часть диска за критическим сечением, поэтому следует оценить допустимость подобного выбора начального подъема. Видно, что полученная в рамках вязкой постановки зависимость хода диска от времени соответствует экспериментальной.

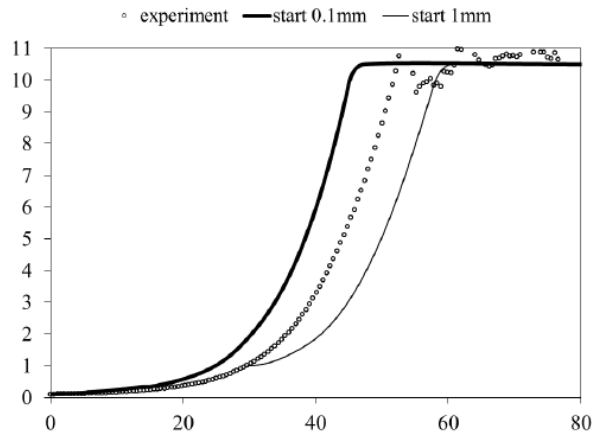


рис.2 График зависимости высоты подъема диска от времени

Как видно из рис. 2, кривая зависимости подъема диска от времени, построенная для начального зазора 0.1 мм, незначительно опережает экспериментальные данные, а задание высоты начального зазора, равной 1 мм, приводит к запаздыванию кривой подъема диска относительно экспериментальной. Из рис.2 следует, что при расчете с начальной высоты подъема диска 1 мм начальная скорость движения диска равна нулю, поэтому угол наклона кривой равен нулю, что противоречит данным расчета с начальной высоты подъема 0.1 мм и приводит к излому кривых. Необходимо отметить, что начальные параметры для старта с зазора в 1 мм были определены по экспериментальным данным. Определение начальной скорости движения диска требует знания предыстории, для чего необходимо в качестве начальной величины зазора использовать высоту подъема диска 0.1 мм. При этом различия между начальными высотами 0.001, 0.01 и 0.1 мм не существенны.

Зависимости суммарной силы на диск от высоты подъема для этих трёх условий приведены на рис.3.

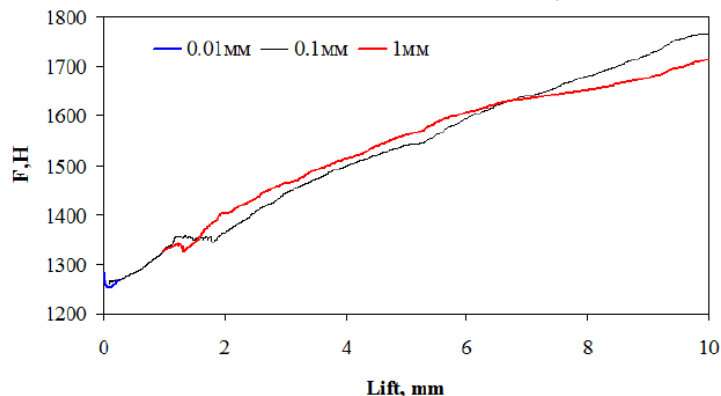


рис. 3 График зависимости силы, действующей на диск от начальной высоты зазора

С использованием распределений газодинамических параметров, полученных после решения укороченной задачи проведен расчёт динамики полного открытия клапана с построением сетки во всей расчетной области клапана (рис. 3). Выполнен расчет поднятия клапан с 0.1 мм до 10 мм без изменения внешних границ области. Расчеты с 0.1 мм и 1 мм проводились до поднятия диска на максимальную высоту 10 мм (рис.3). Расчет с высоты подъема 0.01 мм выполнялся в течение 15 мс, в конце расчета подъем составил 0.32 мм и соответствует силе, полученной при высоте подъема 0.1 мм. Видно, что графики для высот 0.1 мм и 1 мм имеют расхождение, наиболее существенное в области подъема 2 мм. Далее графики изменения сил согласуются между собой, что позволяет утверждать, что расчет полного цикла работы клапана можно проводить с начального зазора 0.1 мм.

Заключение

Проведённое исследование газодинамических процессов в полости предохранительного клапана пружинного типа в начальные моменты его работы показало, что допущение о начальной высоте 0,1 мм подъема диска корректно и может быть использовано в расчетах полного цикла работы клапана с момента его открытия при превышении давления и до закрытия при понижении давления ниже установленного уровня. Полученные согласуются с имеющимися экспериментальными данными, из чего можно сделать вывод о возможности проведения расчетов динамики клапана на основе модели невязкого газа.

Результаты расчётов при различной начальной высоте подъема диска показали, что начальный зазор 0,1 мм обоснован и может быть использован при моделировании работы клапана.

Литература

1. Редер Т., Тененев В.А., Королева М.Р., Мищенко О.В., Воеводина О.А. Численное моделирование газодинамики предохранительного клапана // Интеллектуальные системы в производстве. - 2017.-Т. 15, № 4. - С. 4-11.
2. Королева М.Р., Мищенко О.В., Редер Т., Тененев В.А., Чернова А.А. Численное моделирование процесса срабатывания предохранительного клапана // Компьютерные исследования и моделирование. – 2018. - Т. 10, № 4. - С. 495–509.
3. OpenFOAM. The Open Source CFD Toolbox. Programmer's Guide. Version 2.1.0 15th December 2011.
4. Song X., Cui L., Cao M., Cao W., Park Yo., Dempster W.M. A CFD analysis of the dynamics of a direct-operated safety relief valve mounted on a pressure vessel // Energy Conversion and Management. – 2014. - Vol. 81. – P. 407-419.