

СЕКЦИЯ № 4

ДИНАМИКА И РЕГУЛИРОВАНИЕ ПНЕВМОГИДРОСИСТЕМ /
DYNAMICS AND CONTROL OF PNEUMATIC AND HYDRAULIC SYSTEMS

УДК 621.43:519.8

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ЛЕПЕСТКОВОГО КЛАПАНА В НЕСТАЦИОНАРНОМ
ПОТОКЕ, АЛГОРИТМ И ВАЛИДАЦИЯ НА ОДНОЦИКЛОВОЙ УСТАНОВКЕ

Еникеев Р.Д., Черноусов А.А.

Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, andrei.chernousov@mail.ru

Ключевые слова: поршневые двигатели, лепестковый клапан, обратный клапан, нестационарный поток, трубопровод, идентификация, валидация, одноцикловая установка.

Численный анализ процессов в системах с обратными и лепестковыми клапанами может быть выполнен по сопряженной 3D модели. Но и сопряженные 1D модели динамики и гидрогазодинамики сохраняют значение для анализа и оптимизации технических систем.

Исследуется возможность адекватно смоделировать в 1D нестационарное течение воздуха через блок лепестковых клапанов от двухтактного поршневого ДВС. Особенность модели – упрощенная схема динамики обратного клапана: поступательное движение приведенной массы запорного органа с одной степенью свободы (показана на рис. 1).

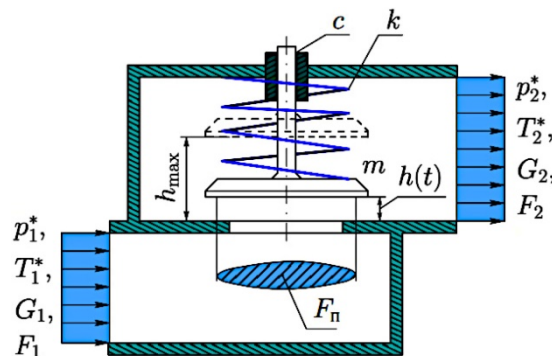


Рис. 1. Расчетная схема обратного клапана для описания динамики лепестковых клапанов

Движение приведенной инертной массы под действием приведенных «газовых» и сил упругости в схеме на рис. 1 описано системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dmv_h}{dt} = P_r + P_{пр} + P_d + P_{пр1} + P_{пр2}, \quad \frac{dh}{dt} = v_h,$$

т. е. системой обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка общего вида:

$$\frac{dU}{dt} = S,$$

где \mathbf{U} – вектор консервативных зависимых переменных, $\mathbf{S} = \mathbf{S}(\mathbf{p}, t)$ – вектор правых частей, \mathbf{p} – вектор «первичных» зависимых переменных, и где также определено взаимно-однозначное соответствие $\mathbf{F}(\mathbf{p}, \mathbf{U}) = 0$, или же явными функциональными связями $\mathbf{U} = \mathbf{U}(\mathbf{p})$ и $\mathbf{p} = \mathbf{p}(\mathbf{U})$, и где учтены, в частности, следующие силы: $P_{пр} = -k \cdot [L_0 - (L_{max} - h)]$ – сила, развиваемая пружиной сжатия, где k – коэффициент жесткости, $L_{max} = L(h = 0)$ – длина пружины при закрытом клапане, $L_0 > L_{max}$ – длина ее в свободном состоянии, $P_d = -cv_h$ – сила вязкого

сопротивления. Также в модель введены две фиктивные силы, задающие не абсолютно жесткие ограничения «сверху» и «снизу» для координаты h запорного элемента клапана:

$$P_{\text{пр}1} = \begin{cases} -k_1 h, & \text{если } h < 0, \\ 0, & \text{если } h \geq 0, \end{cases} \quad P_{\text{пр}2} = \begin{cases} -k_2 \cdot (h - h_{\text{max}}), & \text{если } h > h_{\text{max}}, \\ 0, & \text{если } h \leq h_{\text{max}}, \end{cases}$$

где $k_1 \gg k$ и $k_2 \gg k$ – коэффициенты жесткости.

Модель текущего расхода через клапан – с постоянным коэффициентом расхода.

Алгоритм расчета по 1D модели нестационарного течения в канале описан в [1]; там же можно найти сведения о вычислении потоков на границах ячеек – процедурами расчета распада разрыва на границах, включая клапаны и скачки сечения трубопровода.

Алгоритмы расчета по жестким дифференциальным уравнениям приведенной выше модели динамики клапана реализованы на языке C во внешнем модуле, подключаемом динамически к программе-решателю пакета *ALLBEA* [2]. Исследовались двухстадийные (ограничение со стороны решателя) локально неявные методы без измельчения шага по времени, начиная с неявного двухстадийного метода Рунге – Кутты, где на предварительной стадии (с итерационным уточнением обновленных значений зависимых переменных):

$$t^{(1)} = t^n + \Delta t, \quad (U^{(1)})^{(i+1)} = U^n + \Delta t \cdot S[(p^{(1)})^{(i)}, t^{(1)}], \quad (p^{(1)})^{(i+1)} = p[(U^{(1)})^{(i+1)}];$$

на окончательной стадии (также с итерационным их уточнением):

$$t^{n+1} = t^{(1)}, \quad (U^{n+1})^{(i+1)} = 0,5U^n + 0,5U^{(1)} + 0,5\Delta t \cdot S[(p^{n+1})^{(i)}, t^{n+1}], \quad (p^{n+1})^{(i+1)} = p[(U^{n+1})^{(i+1)}].$$

Удалось получить устойчивый счет и независимые от сетки результаты при k_1 и k_2 , на два порядка превышающих k и при приемлемом шаге по t .

Проверка модели выполнена на экспериментальных данных в нестационарном потоке воздуха в трубопроводе с блоком лепестковых клапанов от двухтактного двигателя. Результаты расчета сравнивали с экспериментом по протеканию расчетной и измеренной зависимостей давления на датчике в сечении трубопровода одноцикловой установки [1] от t . Валидации модели нестационарного течения в трубопроводе предшествовала калибровка внутренних констант модели обратного клапана.

Прошедшая калибровку констант модель клапана в составе модели течения в трубопроводе обеспечила удовлетворительное совпадение расчетного $p(t)$ с измеренным. В то же время хорошего совпадения, достигнутого в [1] для трубопровода с простыми границами участков, с помощью исследуемой модели в данном случае (для трубы с блоком лепестковых клапанов на конце) достичь не удалось.

Таким образом, в данном исследовании построена и проверена экспериментом модель волнового движения воздуха в длинном канале, включающая подмодель обратного клапана. Разработка модели динамики клапана и алгоритмов вычислений нацелена на встраивание в *ALLBEA* [2] как пакет программ для расчетов и оптимизации процессов в трубопроводах, насосах и двигателях.

Практическое применение результатов – планируемая разработка и встраивание в программу-решатель пакета *ALLBEA* предметно-независимого вычислительного ядра, где были бы реализованы методы решения жестких систем дифференциальных уравнений (и систем с другими особенностями в правых частях уравнений мультифизических моделей процессов). Это необходимо для того, чтобы обеспечить эффективность численного анализа процессов в указанном пакете прикладных программ.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания № FEUE-2023-0007 (УУНиТ).

Список литературы

1. Enikeev R.D., Nozdrin G.A., Chernousov A.A. The model and the methods for numerical simulation of wave action of real working fluids in pipelines // Proc. Engineering. 2017. V. 176. P. 461–470.

2. Еникеев Р.Д., Черноусов А.А. Пакет прикладных программ ALLBEA для моделирования и оптимизации процессов энергетических установок // Двигателестроение. 2023. № 4 (294). С. 3–15.

Сведения об авторах:

Еникеев Р.Д., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой ДВС УУНиТ. Область научных интересов: двигатели внутреннего сгорания, поршневые двигатели, газообмен.

Черноусов А.А., канд. техн. наук, доцент, доцент кафедрой ДВС УУНиТ. Научные интересы: двигатели и энергетические установки, численное моделирование и оптимизация.

MODELING OF REED VALVE DYNAMICS IN UNSTEADY FLOW, SOLUTION ALGORITHM, AND VALIDATION ON A SINGLE-CYCLE RIG

Enikeev R.D., [Chernousov A.A.](#)

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia, andrei.chernousov@mail.ru

Keywords: piston engines, reed valve, check valve, unsteady airflow, pipeline, model identification, validation, experiment comparison, single-cycle rig.

This paper presents a study on the modeling of unsteady airflow through reed valves in piston pumps and engines. The research aims to develop a dynamic model incorporating a check valve submodel and to implement it in a computational multiphysics framework capable of numerically simulating processes in pipelines, pumps, and engines. The practical application of this work is in computer-aided engineering (CAE) of engineering systems.

The paper discusses the principles of modeling the valve's motion dynamics, co-simulated with one-dimensional gas dynamics. Algorithms for computations are outlined, with a focus on the algorithm implementation for the CAE package ALLBEA. The approach to identification of the valve model is explored, emphasizing the importance of valve blowdown for model identification and the proposed method for adjusting model coefficients for calibration. Validation of the model is performed using an experimental setup on a single-cycle rig as a benchmark for model identification and calibration. Comparison of computational results with experimental data ensures the validation of the model.

In conclusion, this research provides insights into modeling processes in pipelines with reed valves and suggests potential directions for future work. The paper contributes to the field by presenting a dynamic model and computational framework for analyzing unsteady flows in pipelines, pumps, and engines.

The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignments № FEUE-2023-0007.