

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

© 2024

**Р. Д. Еникеев** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой двигателей внутреннего сгорания;  
Уфимский университет науки и технологий;  
[rust\\_en@mail.ru](mailto:rust_en@mail.ru)

**А. А. Черноусов** кандидат технических наук, доцент кафедры двигателей внутреннего сгорания;  
Уфимский университет науки и технологий;  
[andrei.chernousov@mail.ru](mailto:andrei.chernousov@mail.ru)

Представлены результаты исследования прикладной модели нестационарного потока через узел лепесткового клапана двухтактного поршневого двигателя. Основная цель заключалась в создании и проверке модели на основе расчётной схемы обратного клапана в программном пакете ALLBEA. Кратко обсуждаются принципы моделирования динамики запорного элемента в сопряжении с одномерной моделью газовой динамики, а также алгоритмизация вычислений для их внедрения в пакет. Рассмотрен подход к идентификации модели клапана и предложен метод коррекции коэффициентов модели. Для идентификации и проверки модели использовались данные, полученные с одноцикловой экспериментальной установки, в которой было организовано течение с волнами конечной амплитуды в трубопроводе с лепестковым клапаном. Проведённое исследование вносит вклад в анализ и оптимизацию процессов в трубопроводах, насосах и двигателях, способствует развитию прикладных моделей, программных средств и методик расчётов в указанных областях.

*Поршневой двигатель; лепестковый клапан; обратный клапан; нестационарный поток; трубопровод; идентификация; валидация; одноцикловая установка*

---

**Цитирование:** Еникеев Р.Д., Черноусов А.А. Модель динамики лепесткового клапана в нестационарном потоке, алгоритм и валидация на одноцикловой установке // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 4. С. 112-124. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-4-112-124

### Актуальность темы исследования

Отечественные авиационные поршневые двигатели (АПД) для пилотируемых и беспилотных систем необходимо доводить до высоких удельных и экономических показателей. Применяемые подсистемы газообмена отрабатывают в ходе расчётно-экспериментальных работ, но расчётные инструменты часто не обеспечивают точности ввиду упрощённости представления процессов моделью в ряде аспектов.

Исследование было нацелено на адекватное моделирование работы лепестковых клапанов (ЛК) на впуске форсированных двухтактных АПД по 1D моделям. Тема актуальна в силу того, что нужны модели, алгоритмы вычислений и методики расчётов, встроенные в отечественное прикладное программное обеспечение (ПО); результатом станет уточнение проектировочных расчётов двигателей.

В современных исследованиях численный анализ процессов в лепестковых клапанах, как правило, выполняют по сопряжённым 3D моделям, решая пространственные задачи нестационарной аэроупругости в детализированной постановке. Однако для оперативной интерпретации результатов измерений показателей двигателей на стендах и для выработки рекомендаций по доводке применимы лишь сопряжённые 1D модели динамики и газодинамики.

Ставя задачи реализовать практичные модели ЛК в отечественном ПО с целью повысить точность оперативных расчётов двухтактных АПД, важно исследовать модели динамики ЛК, начиная с моделей на основе несложных расчётных схем. Так, актуально изучить предельные возможности динамической модели ЛК, описывающей движение запорного элемента в рамках расчётной схемы обратного клапана с одной степенью свободы и с учётом наличия двух ограничителей перемещения.

Поскольку такие модели динамики ЛК выражаются жёсткими системами обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), требуют внимания эффективность и устойчивость алгоритмов их решения и сопряжения с алгоритмами 1D расчёта рабочего процесса. Поэтому в настоящей работе был опробован высокоточный и практичный метод решения жёстких систем ОДУ динамики обратного клапана.

Актуальны также методы калибровки («настройки») коэффициентов таких моделей, и подобный метод также был реализован и опробован в данной работе.

Разработка модели динамики ЛК, сопряжённой с 1D моделью процессов нестационарной газовой динамики, реализация модели ЛК методами решения жёстких ОДУ, выработка методики калибровки модели ЛК и проверка адекватности единой мультифизической модели – задачи, которые были поставлены и решены в ходе данного исследования.

### **Постановка задачи и подходы**

В настоящей работе была исследована возможность адекватно смоделировать в 1D нестационарное течение воздуха через блок лепестковых клапанов от двухтактного поршневого двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Для этого были разработаны и реализованы программно: модель ЛК, алгоритм решения её уравнений, методика настройки коэффициентов модели, выполнено сравнение численных решений задачи с данными измерений на одноцикловой установке с трубопроводом.

Принятые подходы характеризуют следующие особенности этапов исследования:

1. Разработанная модель динамики ЛК имеет в основе простую расчётную схему обратного клапана с запорным элементом с одной степенью свободы и ограничением перемещения. Модель выражена жёсткой системой ОДУ и допускает сопряжение с одномерной нестационарной газодинамической моделью течения в трубопроводе (см. ниже разд. «Модель динамики лепесткового клапана»).

2. Реализованный в программном модуле алгоритм решения ОДУ модели динамики представляет собой неявный двухстадийный метод Рунге – Кутты с уточнением на стадиях значений зависимых переменных по методу простой итерации. Численные расчёты по этой модели, сопряжённой с газодинамической моделью течения в трубопроводе, обеспечивались путём динамической компоновки с расчётной программой пакета ALLBEA. В ней отсутствовала встроенная «динамическая» модель ЛК, но была возможность загрузить программный модуль с исследуемой моделью поступательного движения элемента системы (см. ниже разд. «Алгоритмы вычислений» и «Программная реализация»).

3. Применённая методика идентификации модели динамики ЛК основана на измерениях собственной частоты колебаний лепестков, их прогиба и соответствующего усилия, а также измерениях расхода при статической продувке (см. ниже разд. «Идентификация модели»).

4. Дополнительная калибровка (настройка) коэффициентов в субмоделях ЛК реализована путём автоматической оптимизации параметров модели по критерию соответствия данным измерений на одноцикловой установке (см. ниже разд. «Калибровка модели»).

5. Выполненное сравнение численных результатов по калиброванной модели с данными измерений, полученными на одноцикловой экспериментальной установке с генератором волн конечной амплитуды в трубопроводе, можно интерпретировать как валидацию модели (шире: всей методики моделирования); такая валидация желательна на завершающем этапе подготовки данных к расчётам с моделью ЛК в составе единой модели рабочего процесса АПД.

### Экспериментальная установка и порядок измерений

Измерения быстропеременного давления в сечении трубы выполнены на одноцикловой установке [1], общий вид которой показан на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид установки

(справа: канал с узлом лепестковых клапанов на фото, сделанных в разное время)

В состав установки входит генератор волн, состоящий из ёмкости объёмом  $V = 748,2 \text{ см}^3$  и механизма, кратковременно сообщающего ёмкость с трубопроводом посредством клапана. Генератор волн был соединён с трубопроводом в двух вариантах исполнения: в первом варианте – набранным из участков труб с примерно одинаковым диаметром  $d_1 = 24,2 \text{ мм}$  и суммарной длиной  $l_1 = 5185 \text{ мм}$ , с плавным входом, выполненным по лемнискате Бернулли (рис. 2, а). Во втором варианте вместо неё был установлен канал с плавным профилем длиной  $l_2 = 215 \text{ мм}$  с вмонтированным узлом лепестковых клапанов на конце (рис. 2, б). Расстояние от генератора волн до датчика давления было в обоих случаях  $l_{p1} = 510 \text{ мм}$ .

Атмосферное давление в лаборатории  $p_0 = 102,33 \text{ кПа}$ , температура  $t_0 = 26,0^\circ\text{C}$  и  $26,8^\circ\text{C}$  соответственно для процессов в трубопроводах, изображённых на рис. 2.

Исходная волна в трубопроводе – волна разрежения длиной около 2,5 метров и амплитудой примерно минус  $0,4 \text{ кг/см}^2$ .

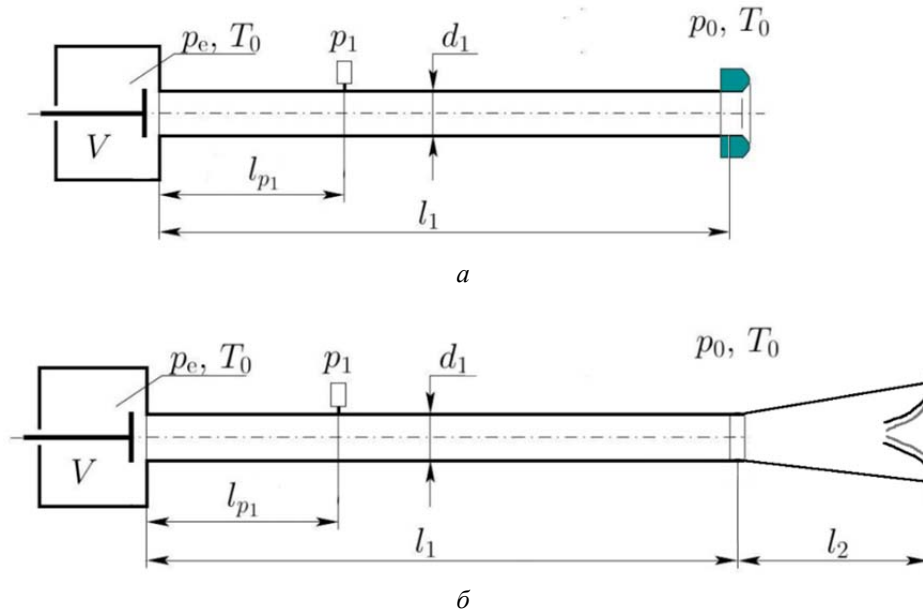


Рис. 2. Трубопровод:  
 а – без лепесткового клапана («контрольный»); б – с лепестковым клапаном

Система измерений – электронная, содержащая высокочастотный усилитель-преобразователь, малоинерционный датчик статического давления на стенке сечения трубы, кабели, аналого-цифровой преобразователь и персональную ЭВМ с управляющей программой. Тарировка производится по манометру и вакуумметру (шкала на 1 кг/см<sup>2</sup>, класс точности 0,4).

### Модель динамики лепесткового клапана

Для описания динамики ЛК разработана модель на основе расчётной схемы обратного клапана. Модель описывает поступательное движение запорного элемента с одной степенью свободы и ограничением перемещения. Она основана на упрощённой схеме с поступательным движением приведённой массы, показанной на рис. 3.

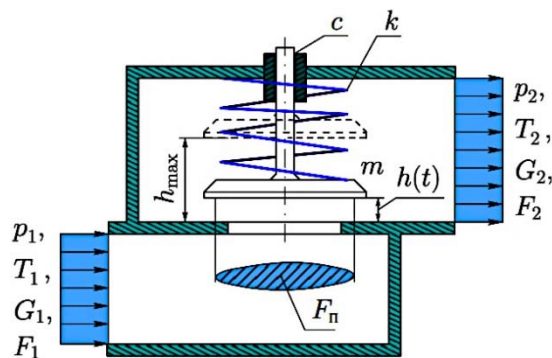


Рис. 3. Расчётная схема обратного клапана  
 для описания динамики лепестковых клапанов

Обозначения на схеме на рис. 3:  $p$  и  $T$  – давление и температура;  $G$  – массовый расход;  $F$  – площадь сечения (если сечение относится к каналу, а не к ёмкости);  $F_n$  – площадь действия разности давлений.

Движение приведённой массы под действием силы разности давлений газов, упругих сил и сил демпфирования в расчётной схеме на рис. 3 описано системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dh}{dt} = v_h, \quad \frac{dmv_h}{dt} = P_r + P_{np} + P_{np1} + P_{np2} + P_d + P_{d1} + P_{d2},$$

где  $m$  – приведённая масса,  $h$  и  $v_h$  – координата и скорость запорного элемента клапана. Силы в правой части уравнения движения учтены описанными ниже субмоделями.

Сила разности давлений газов (при течении в направлении, показанном на рис. 3):

$$P_r = (p_1 - p_2) F_n.$$

Линейно упругая сила (как для пружины сжатия с нулевым усилием при  $h_{min} \geq 0$  и коэффициентом жёсткости  $k$ ):

$$P_{np} = \begin{cases} -k(h - h_{min}), & \text{если } h_{min} \leq h \leq h_{max}, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

и аналогичными субмоделями определены фиктивные силы, задающие не абсолютно жёсткие ограничения «сверху» и «снизу» для  $h$ :

$$P_{np1} = \begin{cases} -k_1(h - h_{min}), & \text{если } h < h_{min}, \\ 0, & \text{если } h \geq h_{min}, \end{cases} \quad P_{np2} = \begin{cases} -k_2(h_{max} - h), & \text{если } h > h_{max}, \\ 0, & \text{если } h \leq h_{max}, \end{cases}$$

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

В работе расчёты выполнены при  $k_1/k = k_2/k = 40$ .

Силы демпфирования, вносящие диссипацию в модель динамики ЛК:

$$P_d = \begin{cases} -cv_h, & \text{если } h_{min} \leq h \leq h_{max}, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$P_{d1} = \begin{cases} -c_1v_h, & \text{если } h < h_{min}, \\ 0, & \text{если } h \geq h_{min}, \end{cases} \quad P_{d2} = \begin{cases} -c_2v_h, & \text{если } h > h_{max}, \\ 0, & \text{если } h \leq h_{max}, \end{cases}$$

где коэффициенты демпфирования выражены через заданный коэффициент затухания:

$$c/(2\sqrt{km}) = c_1/(2\sqrt{k_1m}) = c_2/(2\sqrt{k_2m}) = \zeta = 0,3.$$

Таким образом, модель динамики ЛК выражена жёсткой системой ОДУ 1-го порядка, векторная форма записи которой

$$\frac{d\mathbf{U}}{dt} = \mathbf{S},$$

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 явного вида зависимостями:  $\mathbf{U} = \mathbf{U}(\mathbf{p})$  и  $\mathbf{p} = \mathbf{p}(\mathbf{U})$ .

Описанная модель допускает сопряжение с 1D газодинамической моделью нестационарного течения в трубопроводе – через субмодель расхода газа  $G$  (т. е., потока массы) и потоков других сохраняющихся величин через ЛК.

В наших расчётах применена классическая модель действительного расхода при адиабатном течении смеси газов через ЛК. В этой модели расход  $G = G_2 = G_1$  связан с рядом определяющих параметров. В приближении модели идеального газа с удельной газовой постоянной  $R$  и постоянным же отношением теплоёмкостей  $\gamma$ :

$$G = G(p_1^*, T_1^*, p_2, \gamma, R, \dots) = C_d G_{\text{теор}},$$

где  $p_1^*$  и  $T_1^*$  – полные давление и температура;  $C_d$  – коэффициент расхода;  $G_{\text{теор}}$  определяется по теории изэнтропического расширения такого газа в сужающемся сопле с сечением  $F_c$  на срезе:

$$G_{\text{теор}} = F_c \frac{p_1^*}{\sqrt{T_1^*}} \sqrt{\frac{\gamma}{R}} f(\bar{p}_2, \gamma),$$

с учётом критического режима течения:

$$f = \sqrt{\frac{2}{\gamma-1} \left( \pi_c^\gamma - \pi_c^\gamma \right)}, \text{ где } \pi_c = \max \left[ \bar{p}_2, (\bar{p}_2)_{\text{кр}} = \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \right],$$

где  $\bar{p}_2 = p_2/p_1^*$  – отношение определяющих давлений (параметр режима).

В наших расчётах модель была замкнута постоянным коэффициентом расхода:  $C_d = (C_d)_0$  и субмоделью номинального проходного сечения:  $F_c = \Pi_c h$ , где  $\Pi_c$  – номинальный суммарный периметр отверстий в блоке ЛК.

Применяема описанная модель течения через ЛК, строго говоря, для режимов, автомодельных по числу Рейнольдса и при небольших отношениях давлений на клапане. Также в ней есть допущение, что среда – смесь идеальных газов с теплоёмкостями, локально не зависящими от температуры. Эти предположения выполняются для условий течения в экспериментальной установке.

В [2; 3] приведена система уравнений 1D модели, для которой модель ЛК выступает субмоделью.

### Алгоритмы вычислений

Алгоритм расчёта нестационарного течения в канале по 1D модели описан в [3]. Там же приведены сведения о вычислении потоков на границах ячеек в алгоритме, в который включены процедуры расчёта распада разрыва на границах (таких, как клапаны и другие скачки сечения трубопровода).

Алгоритм расчёта по жёстким ОДУ приведённой выше модели динамики ЛК реализован на языке C во внешнем модуле, подключаемом к решателю пакета ALLBEA [2]. Основа алгоритма решения этой системы ОДУ – двухстадийный (ограничение глобального алгоритма решателя) полностью неявный метод Рунге – Кутты. Выбор неявного метода обусловлен стремлением сохранить шаг по времени достаточно большим (обычно расчёты процессов в одноцикловой установке [3] выполняют с шагом в  $10^{-5}$  с).

На первой (предварительной) стадии метода:

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

где  $i = 1, \dots$  – номер уточняющей итерации на стадии. В качестве первого приближения берётся

$$(\mathbf{U}^{(1)})^{(1)} = \mathbf{U}^n + \Delta t \mathbf{S}(\mathbf{p}^n, t^n).$$

На второй (окончательной) стадии метода:

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

где за первое приближение берётся

$$(\mathbf{U}^{n+1})^{(1)} = \mathbf{U}^{(1)}.$$

Итерационное уточнение зависимых переменных на обеих стадиях метода было успешно реализовано по методу простой итерации. Этот метод оказался подходящим для поставленной задачи; альтернативные методы итераций, прежде всего, метод Ньютона, не рассматривались из-за большей сложности в реализации.

Таким образом, для решения уравнений модели динамики ЛК была проверена возможность применить двухстадийный полностью неявный метод Рунге – Кутты.

### Программная реализация

Для исследовательских расчётов движения волн в трубопроводе с ЛК требовалось реализовать и интегрировать описанную модель динамики лепесткового клапана в расчёт по единой мультифизической 1D модели. Следовало вначале отработать функционал динамической модели ЛК и лишь затем планировать её полную интеграцию в пакет ALLBEA.

Для вычисления газодинамических потоков через текущее сечение клапана на стадиях расчётного шага использованы встроенные функции ALLBEA. Потребовалась лишь небольшая доработка встроенной статической версии модели ЛК в ходе описываемой разработки динамической модели.

Модель динамики запорного элемента и неявный двухстадийный метод Рунге – Кутты были реализованы во внешнем модуле, который подключается к расчётной программе пакета ALLBEA как «пользовательская» модель поступательного движения запорного элемента.

Решатель осуществляет расчёт по глобальной 1D модели с глобально двухстадийным методом обновления. Это позволяет вычислять мгновенные значения с высокой точностью. 1D модель, двухстадийный алгоритм, реализующий высокоточный метод, а также сравнение с данными измерений на одноцикловой установке с простой конфигурацией трубопровода описаны в [3; 4].

### Порядок расчётов

В графической среде ALLBEA собраны блочные структурные схемы («сборки»; рис. 4) 1D моделей процессов для обоих вариантов исполнения (см. рис. 2) трубопровода экспериментальной установки.

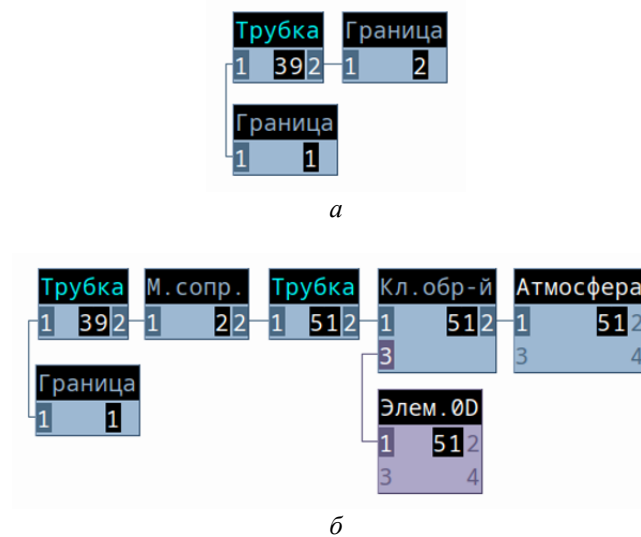


Рис. 4. Структурные схемы 1D моделей:

а – без лепесткового клапана (рис. 2, а); б – с лепестковым клапаном (см. рис. 2, б)

В папку второго проекта (рис. 4) добавлены исходный код и средства построения программного файла с расширением .dll для динамической компоновки внешнего модуля, реализующего модель динамики ЛК. В первом проекте заданы численный метод, описанный в [3] и шаг по времени, равный  $1 \cdot 10^{-5}$  с. При таком шаге, как показали сравнительные расчёты, результаты перестают зависеть от сетки (длины ячеек в трубках и расчётного шага по времени).

### Идентификация модели

Для валидации 1D модели с субмоделью ЛК необходима было вначале «подогнать» профили исходных волн на датчике давления. Требовалось автоматизировать подбор (идентификацию) параметров, определяющих «закон» изменения давления по времени, заданный в граничных условиях (ГУ) на левом конце трубы (в модели «Граница»).

С этой целью в папки расчётных проектов были добавлены средства, обеспечивающие работу программы ALLBEA ОПТИМ [5]. В ней реализован генетический алго-



ритм поиска экстремума целевой функции (ЦФ). В модуле, обеспечивающем адаптацию алгоритма к конкретной оптимизационной задаче, определена ЦФ, выражающая сумму квадратов отклонений расчётной зависимости  $p(t)$  на датчике от измеренной за период регистрации на нем исходной волны разрежения.

После подбора параметров ГУ выполнен расчёт процесса в трубе без ЛК в течение 0,2 с. Диаграммы  $p(t)$  из расчёта и из эксперимента показаны на рис. 5.

Отклонения от измеренной зависимости  $p(t)$  имеют примерно такой же вид, как на аналогичных графиках, полученных в [4]. Привычный вид графиков говорит о том, что грубых промахов в задании длин размеров труб и тарировке системы измерений в расчёте нет. Таким образом, 1D модель без ЛК была протестирована и была принята в качестве базы для модификации в модель с ЛК (рис. 2, б) и для сравнения отклонений от эксперимента.

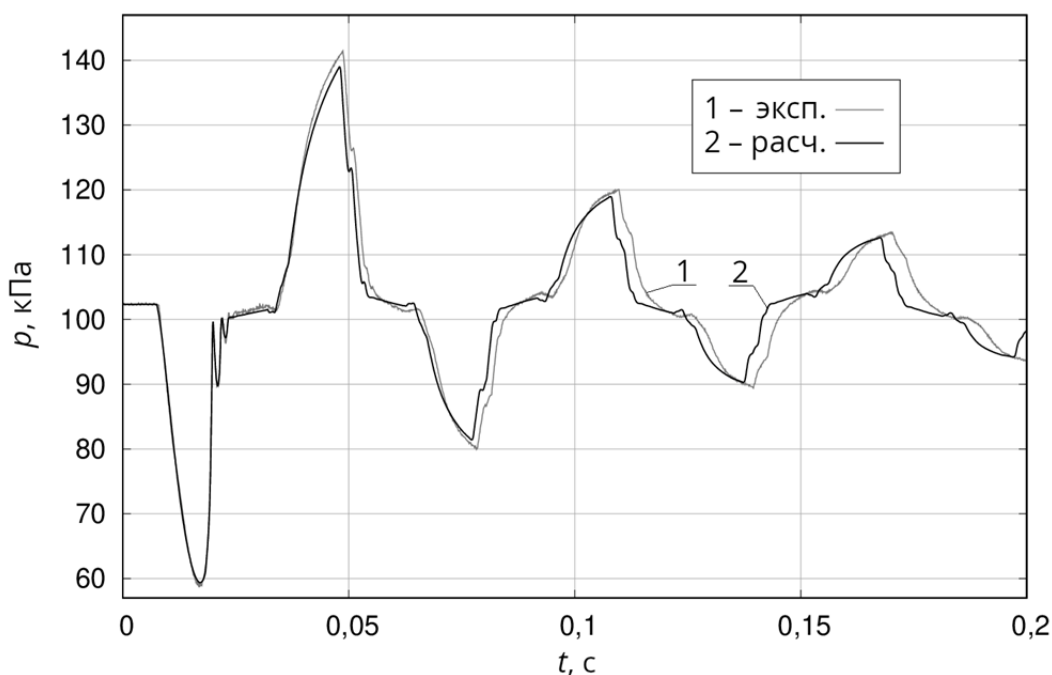


Рис. 5. Графики давления на датчике в трубе без ЛК (схема – на рис. 2, а)

По описанной технологии подобраны параметры закона  $p(t)$  в ГУ и расчётного проекта с 1D моделью трубы с ЛК.

В расчёте процесса по 1D модели с ЛК параметры субмоделей динамики запорного элемента и течения через ЛК подставлялись после приближенной идентификации их значений посредством прямых и косвенных измерений и оценок, как описано ниже.

1. Значения геометрических параметров в этих субмоделях определены в первом приближении из ряда прямых и косвенных измерений на образце узла ЛК, встроенного в канал (рис. 1). Постоянный условный периметр в модели проходного сечения определён измерением сторон  $a$  и  $b$  прямоугольных окон под лепестками (с учётом числа окон и лепестков в узле ЛК  $i = 6$ ):

$$\Pi_c = 2i(a + b) = 12(18 + 25) = 516 \text{ мм.}$$

Площадь, на которую действует разность давлений:  $F_n = iab = 2700 \text{ мм}^2$ .

2. Данные о жёсткости  $k$  получены интерпретацией измерений прогиба лепестка в ответ на приложение известной силы к лепестку в центре окна. Вычислено:

$$k = (P_r)_1 i / \Delta h = 15056 \text{ Н/м.}$$

3. Приведённая (к той же точке на лепестке) суммарная масса  $m$  лепестков оценена в первом приближении из частоты гармонических колебаний:  $(\omega)_0 = \sqrt{k/m}$ , где последняя принята равной основной частоте  $f = 245$  Гц в спектре шума колеблющихся при продувке лепестков; вычислено:  $m = k / (2\pi f)^2 = 0,0063534 \text{ кг} \approx 6,35 \text{ г}$ .

4. Выполнена статическая продувка ЛК. На основе данных о расходе на выбранной режимной точке (в допущении о полном раскрытии лепестков:  $h = h_{\max}$ ) с помощью подбора в ALLBEA OPTIM получено и зафиксировано постоянное значение коэффициента расхода:  $(C_d)_0 = 0,5981$ . Максимальный ход модельного запорного элемента (тех же базовых точек 6 лепестков) определён в первом приближении и зафиксирован как  $h_{\max} = 1,6 \text{ мм}$ , откуда  $(F_c)_{\max} = \Pi_c h_{\max} = 825,6 \text{ мм}^2$  (и также принято  $h_{\min} = 0$ ).

В расчёте по 1D модели заданы указанные значения параметров и шаг по времени:  $\Delta t = 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}$  (вдвое меньший, чем ранее).

Предварительные расчёты по 1D модели с идентифицированной структурой (рис. 4, б) и параметрами показали устойчивый счёт при  $k_1$  и  $k_2$ , превышающих  $k$  на один-два порядка. Сходимость же рассчитанных и измеренных отражённых от ЛК волн сжатия оказалась неудовлетворительной. Чтобы несколько улучшить сходимость, было изменено значение одного параметра: площадь  $F_n$ , определённая по номинальным размерам шести прямоугольных окон под лепестками ЛК как  $27,0 \text{ см}^2$ , произвольно увеличена до  $38 \text{ см}^2$ . Но это улучшило сходимость только для первой и второй отражённых волн.

Диаграммы  $p(t)$  из расчёта и из эксперимента показаны на рис. 6.

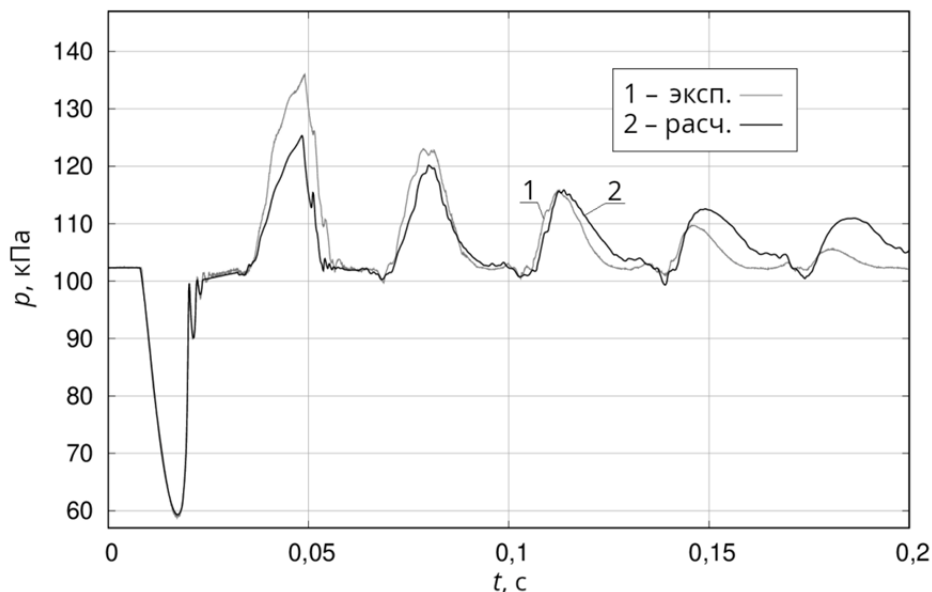


Рис. 6. Давление на датчике в трубе с ЛК (рис. 2, б) после идентификации параметров

### Калибровка модели

Калибровка модели состояла в том, что значения пяти параметров в исходных данных ( $h_{\min}$ ,  $h_{\max}$ ,  $m$ ,  $k$  и  $F_{\Pi}$ ) уточнены оптимизационным подбором. С применением той же технологии и программы ALLBEA OPTIM автоматизирован подбор значений этих пяти параметров по критерию соответствия расчётного давления  $p(t)$  на датчике измеренному давлению. В формулировку ЦФ вошла сумма среднеквадратического отклонения давлений в расчёте и эксперименте (в этот раз – за весь период модельного времени в 0,2 с) и «штрафа» за среднеарифметическое отклонение калибровочных множителей от 0 (для первого из них, иначе – от 1), с заданным весовым коэффициентом.

Решение задачи – значения безразмерных калибровочных множителей:  $C_{h_{\min}} = 0,101$ ;  $C_{h_{\max}} = 1,130$ ;  $C_m = 0,934$ ;  $C_k = 0,805$ ;  $C_{F_{\Pi}} = 1,963$ .

Все они, кроме последнего, лишь незначительно скорректировали параметры модели, которые в результате приняли значения:

$$\begin{aligned} \tilde{h}_{\min} &= C_{h_{\min}} h_{\max} = 0,162 \text{ мм}, \quad \tilde{h}_{\max} = C_{h_{\max}} (h_{\max} - h_{\min}) + h_{\min} = 1,808 \text{ мм}, \\ \tilde{m} &= C_m m = 5,93 \text{ г}, \quad \tilde{k} = C_k k = 12120 \text{ Н/м}, \quad \tilde{F}_{\Pi} = C_{F_{\Pi}} F_{\Pi} = 53,0 \text{ см}^2. \end{aligned}$$

После подбора значений указанных параметров рассчитан процесс в трубе с ЛК в течение 0,2 с. Диаграммы  $p(t)$  из расчёта и из эксперимента показаны на рис. 7.

Для модели, прошедшей калибровку, отклонения (рис. 7) расчётной зависимости  $p(t)$  от измеренной на трубе с ЛК (причём для всех отражённых волн – от первой до пятой включительно) невелики по сравнению с отклонениями на рис. 6. Данный результат можно считать положительным результатом валидации предложенной и откалиброванной нами динамической модели ЛК (конечно, применительно к условиям единичного эксперимента на одноцикловой установке).

То есть, 1D модель трубопровода с ЛК, прошедшая идентификацию и калибровку параметров модели ЛК, показала хорошие результаты сравнения с экспериментом.

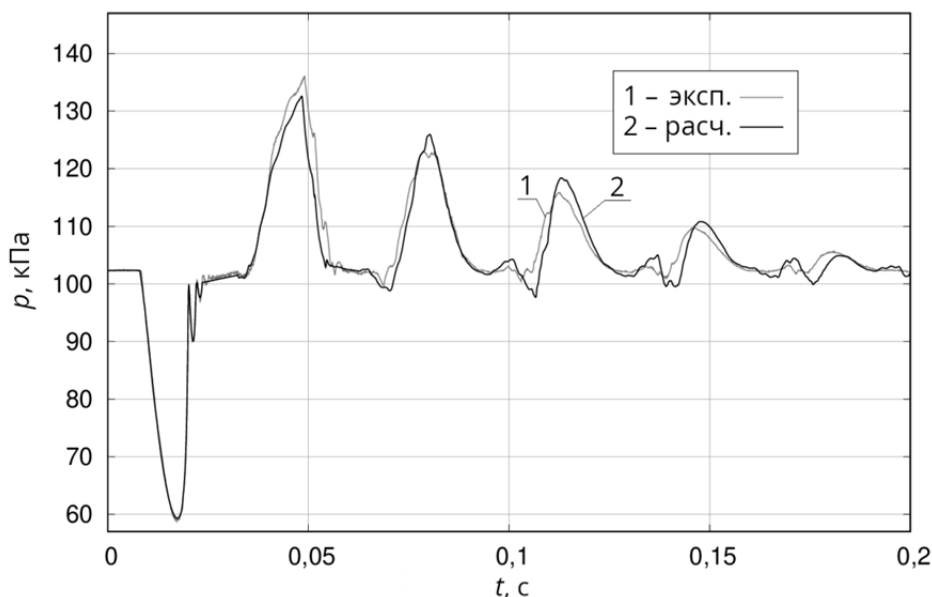


Рис. 7. Давление на датчике в трубе с ЛК (рис. 2, б) после калибровки модели

## Основные результаты и перспективы развития работы

В настоящей работе представлена модель динамики лепесткового клапана на основе схемы обратного клапана с двумя ограничителями. Разработана методика идентификации параметров модели, основанная на измерении собственной частоты колебаний лепестков и расхода воздуха. Дополнительно произведена калибровка коэффициентов итоговой модели процесса с использованием данных измерений на одноцикловой установке и автоматической оптимизации параметров.

Выполнена экспериментальная валидация модели лепесткового клапана, включая предложенную методику идентификации и калибровки. Хотя валидация не была исчерпывающей, калиброванная модель клапана в составе модели течения в трубопроводе показала удовлетворительное совпадение расчётного давления  $p(t)$  с измеренным. Однако, достигнутые результаты не столь точны, как в [3] для трубопровода с простыми границами, что вызвано сложностью рассматриваемого случая с блоком лепестковых клапанов на конце трубы.

Таким образом, разработана и экспериментально проверена модель волнового движения воздуха в длинном канале, включающая субмодель обратного клапана. Эта работа направлена на дальнейшее встраивание данной модели и связанных алгоритмов в пакет программ ALLBEA [2], предназначенный для анализа и оптимизации процессов в трубопроводах, насосах и двигателях.

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

## Библиографический список

1. Гришин Ю.А., Рудой Б.П. Установка для генерирования уединённых волн конечной амплитуды // Межвузовский научный сборник «Элементы теории рабочих процессов ДВС». Выпуск 1. Уфа: УАИ, 1976. С. 53-55.
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. DOI: 10.18698/jec.2023.4.3-15
3. 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 // Procedia Engineering. 2017. V. 176. P. 461-470. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.345
4. Chernousov A.A., Enikeev R.D. Friction and heat transfer models derivation, validation and calibration on experimental data for unsteady air flow in pipe // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2023. P. 496-507. DOI: 10.1007/978-3-031-14125-6\_50
5. Черноусов А.А. Программа ALLBEA ОПТИМ для оптимизации параметров по генетическому алгоритму: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2021666333; опубл. 13.10.2021; бюл. № 10.

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

© 2024

**R. D. Enikeev** Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Internal Combustion Engines; Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation; [rust\\_en@mail.ru](mailto:rust_en@mail.ru)

**A. A. Chernousov** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor at the Department of Internal Combustion Engines; Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation; [andrei.chernousov@mail.ru](mailto:andrei.chernousov@mail.ru)

The results of studying an application model of unsteady flow through the reed valve assembly of a two-stroke piston engine are presented. The main goal was to develop and validate a model based on the check valve calculation scheme in the ALLBEA software package. The principles of modeling the valve motion dynamics in conjunction with a one-dimensional model of gas dynamics, as well as the algorithmic presentation of calculations for their implementation in the package, are briefly discussed. An approach to valve model identification and the proposed method for adjusting the model coefficients are considered. For the identification and validation of the model the data obtained from a single-cycle experimental setup were used, in which flow through the reed valve with finite amplitude waves in the pipeline was organized. The conducted research contributes to the analysis and optimization of processes in pipelines, pumps, and engines, promotes the development of applied models, software tools, and calculation methods in the specified areas.

*Piston engine; reed valve; check valve; unsteady flow; pipeline; identification; validation; single-cycle rig*

---

**Citation:** Enikeev R.D., Chernousov A.A.. Model of reed valve dynamics in unsteady flow, solution algorithm, and validation on a single-cycle rig. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 4. P. 112-124. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-4-112-124

### References

1. Grishin Yu.A., Rudoy B.P. Ustanovka dlya generirovaniya uedinennykh voln konechnoy amplitudy. *Mezhvuzovskiy nauchnyy sbornik «Elementy Teorii Rabochikh Protessov DVS»*. Vypusk 1. Ufa: UAI Publ., 1976. P. 53-55. (In Russ.)
2. Enikeev R.D., Chernousov A.A. ALLBEA application software package to simulate and optimize processes in the energy systems. *Engines Construction*. 2023. No. 4 (294). P. 3-15. (In Russ.). DOI: 10.18698/jec.2023.4.3-15
3. 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. *Procedia Engineering*. 2017. V. 176. P. 461-470. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.345
4. Chernousov A.A., Enikeev R.D. Friction and heat transfer models derivation, validation and calibration on experimental data for unsteady air flow in pipe. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2023. P. 496-507. DOI: 10.1007/978-3-031-14125-6\_50
5. Chernousov A.A. *Programma ALLBEA OPTIM dlya optimizatsii parametrov po geneticheskomu algoritmu* [ALLBEA OPTIM software for optimizing parameters using a genetic algorithm]. Certificate of state registration of computer program no. 2021666333, 2021. (Publ. 13.10.2021, bull. no. 10)