

УДК 621.43

Д.В. Косолапов, В.Л. Химич

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ ФОРСУНКИ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются проблемы автоколебаний запорной иглы при работе топливной форсунки в поршневых двигателях с воспламенением от сжатия. Предложен уточненный метод оценки устойчивости работы топливной форсунки.

Ключевые слова: поршневой двигатель, форсунка, запорная игла, автоколебания, устойчивость, моделирование.

Интерес к неустойчивому режиму работы дизельной форсунки возник при наблюдении характерного звука при пуске дизеля и на холостом ходу его работы (режимы пониженного расхода топлива). Причина такого звукового эффекта заключается в колебании иглы форсунки. Под действием периодически возникающих сил в гидравлической системе форсунки она совершает возвратно-поступательное движение, так как источник энергии этих колебаний, которым является давление подаваемого топлива, можно принять постоянным по значению, а колебания иглы индуцируются самой гидравлической системой, то данные колебания являются автоколебательными.

При проектировании и эксплуатации дизелей информация о характере предрасположенности гидравлической системы форсунки к автоколебательному режиму имеет важное значение. Во-первых, принято считать, что неустойчивость работы форсунки имеет негативный характер из-за возможной интенсификации износа подвижных деталей.

Следовательно, на ранних стадиях проектирования форсунки необходимо исключить возникновение автоколебательного процесса при рабочих режимах дизеля. Во-вторых, наличие неустойчивого режима форсунки является показателем удовлетворительной подвижности иглы при безразборной диагностике во время приемочных испытаний. При хорошей подвижности иглы форсунка должна издавать характерный звенящий звук. При проведении подобного рода безразборной дефектации возникает проблема субъективного восприятия результатов испытаний и проблема индивидуального поведения каждой форсунки, даже одной и той же серии, что связано с вариацией параметров из-за погрешности изготовления.

Для этого в ходе проектно-конструкторских работ нужно иметь инструмент для оценки устойчивости форсунки. В литературе 1960-80-х годов в качестве такого инструмента приведена гидравлическая характеристика: зависимость расхода топлива от давления. По определенным зонам гидравлической характеристики оценивается устойчивость конкретной форсунки. Данный метод имеет ряд недостатков. Он не дает информации о влиянии на устойчивость форсунки ее отдельных параметров, т.е. если возникнет необходимость откорректировать ситуацию по устойчивости через гидравлическую характеристику, то придется действовать «вслепую»: задавать приращение какого-либо параметра и смотреть на отклик на графике. При этом нет четкой информации о тенденции смещения этого отклика. Также данный метод не учитывает динамических параметров автоколебательного процесса, что может привести к неадекватному отображению границы устойчивости на графике гидравлической характеристики.

Альтернативный метод оценки устойчивости форсунки – использование математической модели автоколебательного режима. В период 1960-80-х годов такой подход не нашел развития: в исследовательских работах математическую модель использовали для получения

информации о характере самих колебаний. Современное развитие ЭВМ и прикладных программных пакетов позволило сформировать принципиально новый, относительно классического метода, способ оценки устойчивости физической системы, описываемой дифференциальным уравнением 3-го порядка, которой, в частности, является гидравлическая система дизельной форсунки с запорной иглой. Данный метод основан на использовании критерия Раусса-Гурвица для оценки устойчивости физической системы, устойчивость которой описывается дифференциальным уравнением 3-го порядка (1):

$$(A_0 D^3 + A_1 D^2 + A_2 D + A_3)x = 0, \quad (1)$$

где $D = \frac{d}{dt}$; A_0, A_1, A_2, A_3 – коэффициенты, определяющие устойчивость системы; x – регулируемая переменная (у дизельной форсунки – это координата иглы).

Для того чтобы данная система была устойчива, достаточно выполнения условия Раусса-Гурвица:

$$A_0, A_1, A_2, A_3 > 0, A_1 A_2 > A_0 A_3. \quad (2)$$

Отсюда видно, что не представляет труда проверить форсунку на устойчивость ее работы, зная значение параметров A_0, A_1, A_2, A_3 .

Применительно к дизельной форсунке коэффициенты в дифференциальном уравнении (1) представляют собой достаточно большие алгебраические выражения:

$$A_0 = m\beta V;$$

$$A_1 = m \sqrt{\frac{2\Delta p}{\gamma}} \cdot \frac{\mu_u \pi x (d_2 \sin \alpha - x \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha)}{2\Delta p} + \theta \beta V;$$

$$A_2 = \theta \sqrt{\frac{2\Delta p}{\gamma}} \cdot \frac{\mu_u \pi x (d_2 \sin \alpha - x \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha)}{2\Delta p} +$$

$$+ \beta V (c - \Delta p) \frac{2(\pi d_2 \sin \alpha - 2\pi x \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha)(x)(\mu_c f_c)^2 (\mu_u \pi x (d_2 \sin \alpha - x \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha))^2}{[(\mu_c f_c)^2 + (\mu_u \pi x (d_2 \sin \alpha - x \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha))^2]^2} +$$

$$+ \frac{\pi}{4} (d_u^2 - d_1^2) \left[\frac{\pi}{4} (d_u^2 - d_1^2) + \frac{\pi}{4} d_1^2 \frac{(\mu_u \pi x (d_2 \sin \alpha - x \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha))^2}{(\mu_u \pi x (d_2 \sin \alpha - x \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha))^2 + (\mu_c f_c)^2} \right];$$

$$A_3 = (c - \Delta p) \frac{2(\pi d_2 \sin \alpha - 2\pi x \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha)(\mu_c f_c)^2 (\mu_u \pi x (d_2 \sin \alpha - x \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha))^2}{[(\mu_c f_c)^2 + (\mu_u \pi x (d_2 \sin \alpha - x \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha))^2]^2}.$$

$$\cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\gamma}} \cdot \frac{\mu_u \pi x (d_2 \sin \alpha - x \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha)}{2\Delta p} +$$

$$+ \sqrt{\frac{2\Delta p}{\gamma}} \cdot (\mu_u (\pi d_2 \sin \alpha - 2\pi x \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha)) \sqrt{\frac{(\mu_c f_c)^2}{(\mu_c f_c)^2 + (\mu_u \pi x (d_2 \sin \alpha - x \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha))^2}} - \quad (3)$$

$$- \frac{(\mu_u \pi x (d_2 \sin \alpha - x \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha))^2 \cdot (\mu_c f_c)^2}{[(\mu_c f_c)^2 + (\mu_u \pi x (d_2 \sin \alpha - x \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha))^2]^{3/2}}.$$

$$\cdot \left[\frac{\pi}{4} (d_u^2 - d_1^2) + \frac{\pi}{4} d_1^2 \frac{(\mu_u \pi x (d_2 \sin \alpha - x \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha))^2}{(\mu_u \pi x (d_2 \sin \alpha - x \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha))^2 + (\mu_c f_c)^2} \right];$$

где m – масса подвижных деталей форсунки; V – объем кармана форсунки; β – коэффици-

ент сжимаемости топлива; Δp – давление впрыска; γ – плотность топлива; x – координата подъема иглы; $f_u(x)$ – функция зависимости площади первого дросселирующего сечения от подъема иглы; f_c – площадь второго дросселирующего сечения; μ_u – коэффициент расхода первого дросселирующего сечения; μ_c – коэффициент расхода второго дросселирующего сечения; d_u – диаметр направляющей иглы в прецизионной паре; d_l – диаметр иглы в области кармана; c – жесткость пружины.

С изменением какого-либо параметра форсунки эти коэффициенты будут меняться. Для примера возьмем форсунку ОАО «РУМО». Изменение произведения коэффициентов A_1A_2 , A_0A_3 от давления подаваемого в форсунку топлива представлено на рис. 1. В соответствии с критерием Раусса-Гурвица рабочая область слева от точки пересечения характеризует устойчивую работу форсунки, а область справа от точки пересечения – неустойчивую.

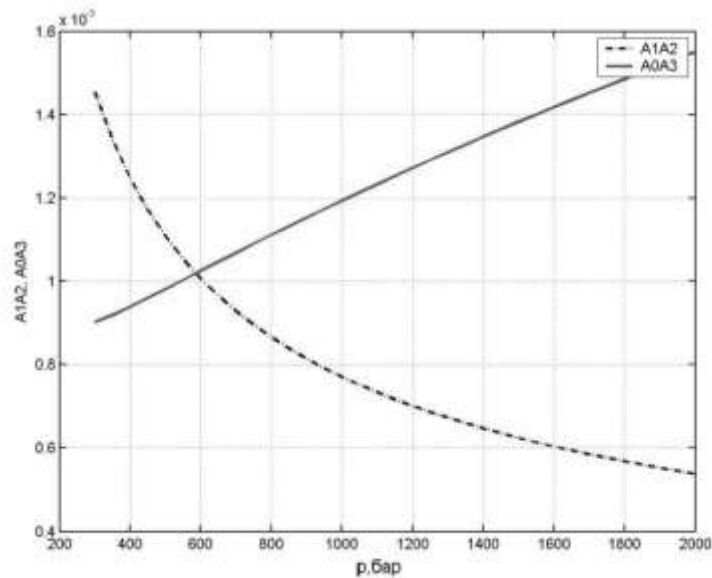


Рис. 1. Зависимость произведения коэффициентов A_1A_2 , A_0A_3 от давления подаваемого в форсунку топлива

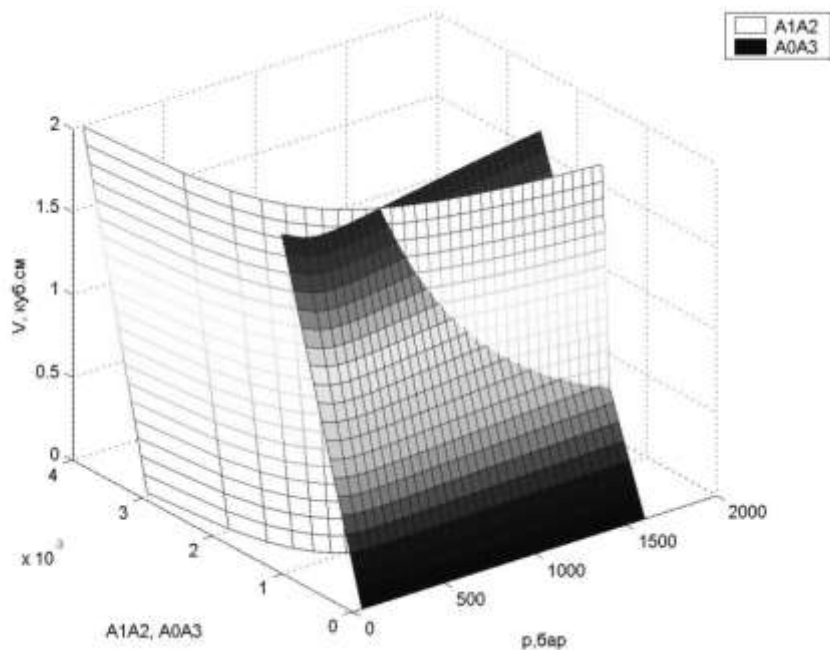


Рис. 2. Смещение границы устойчивости в зависимости от давления и объема кармана форсунки

Предложена идея в данную двумерную картину ввести 3-ю координату в виде другого параметра форсунки. На рис. 2 этим параметром является объем кармана форсунки. В результате имеем не две пересекающиеся кривые, а две поверхности и не точку пересечения кривых, а линию. Данная операция осуществлена в программном пакете MATLAB. По сути, данная линия будет показывать смещение границы устойчивости при изменении любых двух параметров.

В итоге мы имеем информацию о взаимосвязанном влиянии двух параметров форсунки на ее устойчивость. Это позволит осуществить оптимизационный подбор этих параметров для исключения неустойчивости работы форсунки. Данный подход может позволить создать методику по подбору параметров форсунки для обеспечения устойчивости ее работы, что может найти применение в процессе проектирования форсунки, а также служить инструментом в исследовательской работе по изучению влияния различных параметров форсунки на ее устойчивость.

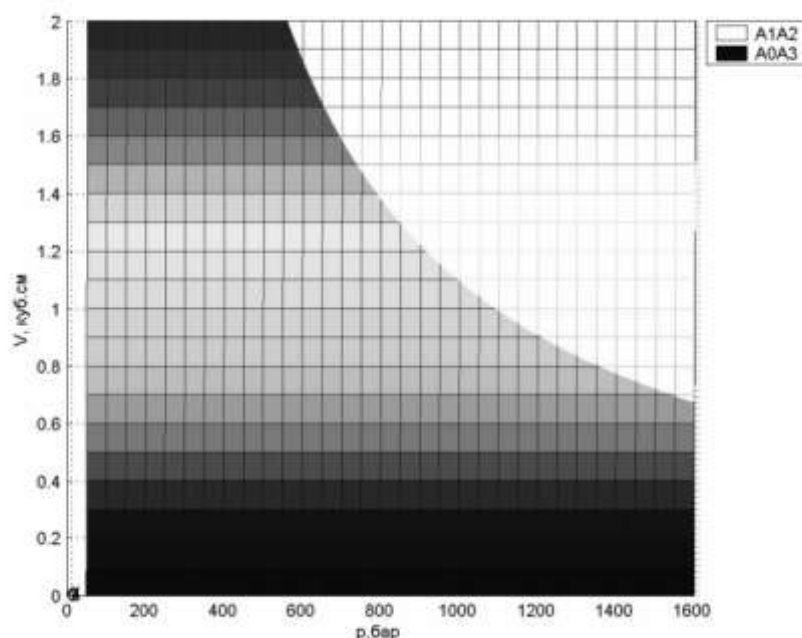


Рис. 3. Смещение границы устойчивости в зависимости от давления и объема кармана форсунки (вид со стороны оси A_1A_2 , A_0A_3)

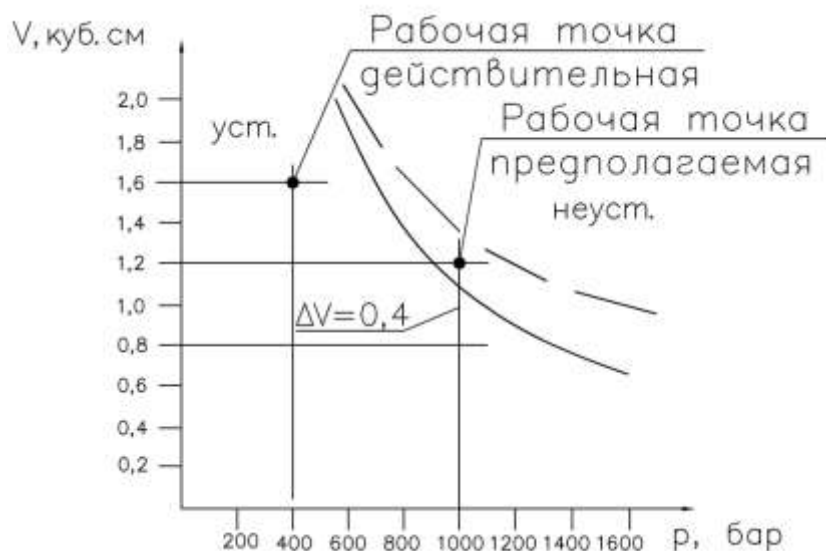


Рис. 4. Смещение границы устойчивости в зависимости от давления и объема кармана форсунки (упрощенный вид)

Схема методики оценки устойчивости форсунки выглядит следующим образом. Давление впрыска форсунки ОАО «РУМО» примерно составляет 400 бар. Можно проанализировать, как изменится устойчивость этой форсунки при увеличении давления впрыска, например, до 1000 бар. Развернем график на рис. 2 до вида, показанного на рис. 3. В результате графическую зависимость устойчивости форсунки от давления и объема кармана форсунки можно редуцировать до вида, показанного на рис. 4. Из графика видно, что для сохранения устойчивости при давлении $p = 1000$ бар необходимо уменьшить объем кармана до $0,8 \text{ см}^3$ от существующего значения $1,6 \text{ см}^3$. Допустим V возможно снизить только до $1,2 \text{ см}^3$. Необходимо найти эквивалентные по эффективности приращению объема $\Delta V = 0,4 \text{ см}^3$ приращения других параметров. Такие эквивалентные приращения можно быстро найти методом подбора.

В итоге имеем приращения параметров $d1$ (диаметр иглы в области кармана), d_i (диаметр направляющей иглы в прецизионной паре), x (координата подъема иглы), которые приведут к подъему линии границы устойчивости на величину $\Delta V = 0,4 \text{ см}^3$ (рис. 5). Получаем достаточно точные количественные инструкции для исключения неустойчивого режима работы форсунки при увеличении давления впрыска от 400 до 1000 бар. Поэтапная иерархия методики применительно к данному сюжету проектирования показана на рис. 6.

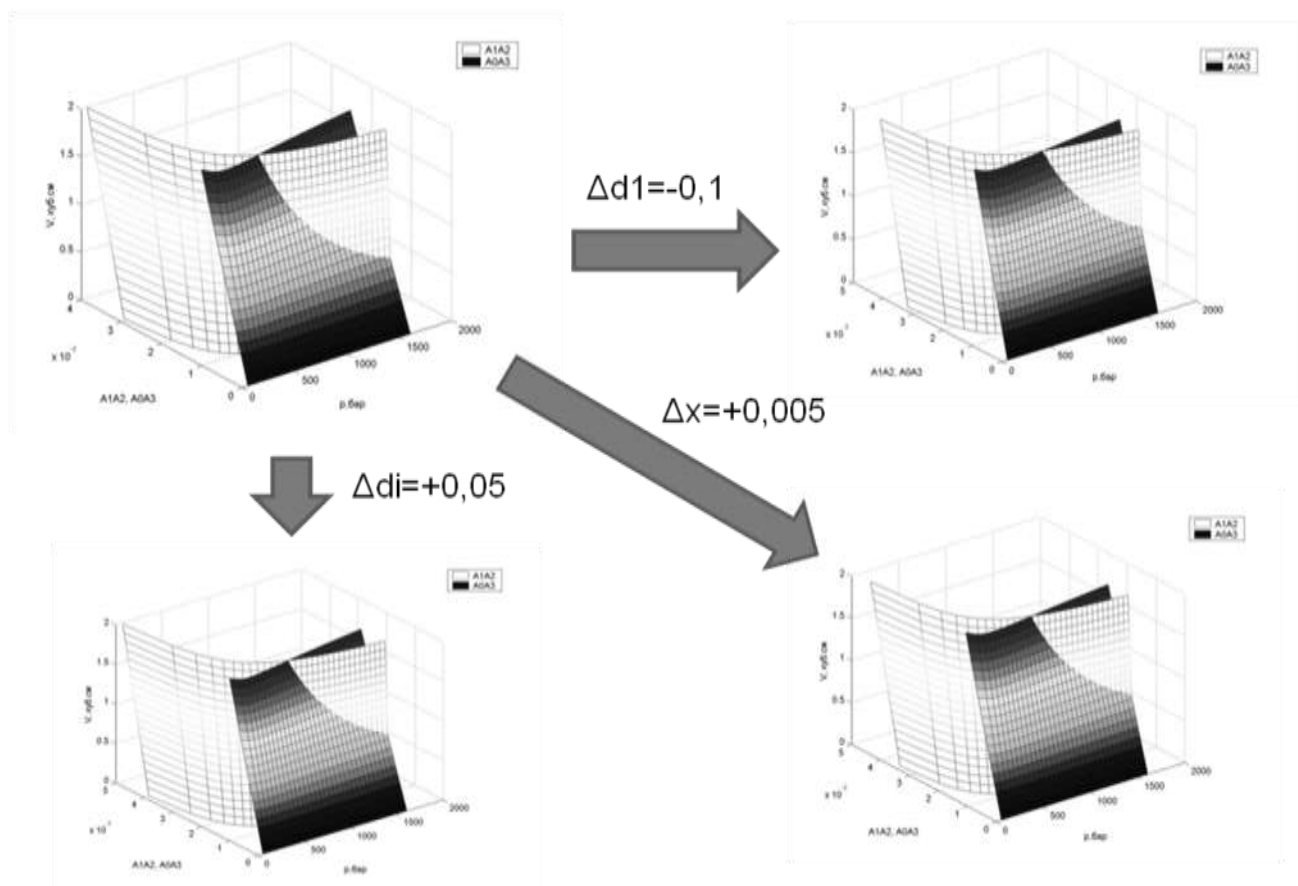


Рис. 5. Влияние приращений различных параметров на положение линии границы устойчивости форсунки

В общем случае предложенная методика может быть применима к любому варианту проектирования дизельной форсунки, а также к оценке устойчивости любой физической системы, описываемой дифференциальным уравнением 3-го порядка.

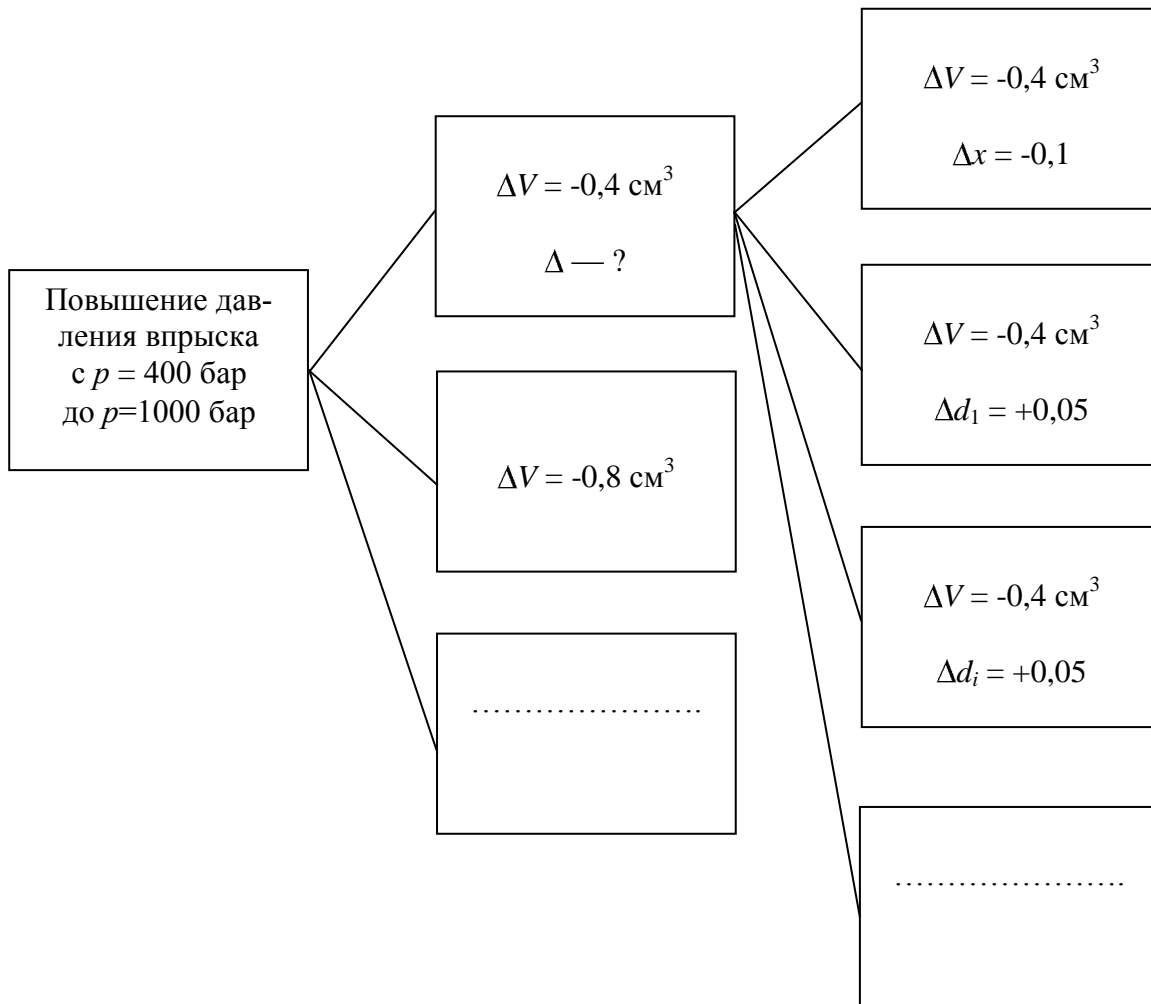


Рис. 6. Схема применения методики оценки устойчивости дизельной форсунки

Дата поступления
в редакцию 09.06.2010

D.V. Kosolapov, V.L. Khimich

STUDY OF NOZZLE STABILITY OF DIESEL ENGINE

The problems of needle self-oscillations of the fuel injectors in diesel engines are considered. A refined method for assessing the sustainability of the nozzle of diesel engine is proposal.

Key words: Internal combustion engine, nozzle, stop needle, self-oscillations. stability, modeling.