

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА НЕУСТОЙЧИВЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ КАМЕР СГОРАНИЯ

Анисимов В.С., Данильченко В.П., Савченко В.П., Ярославцев В.Г.

ОАО СНТК им. Н.Д. Кузнецова, г. Самара

При создании камер сгорания ЖРД и ГТД отмечаются случаи возникновения неустойчивости рабочего процесса с высокочастотными колебаниями давления. Различают мягкое и жесткое возбуждение колебаний. Мягкое возбуждение колебаний обычно характеризуется хорошей воспроизводимостью, стабильностью и отмечается всякий раз при достижении определенного режима работы камеры - границы неустойчивости. Жесткое возбуждение не всегда выявляется сразу, считается нерегулярным, невоспроизводимым, наиболее опасным и в то же время наименее поддающимся изучению [1]. Отмечавшиеся в практике доводки камер сгорания случаи жесткого возбуждения колебаний объясняются воздействием на рабочий процесс каких-либо внутренних или внешних импульсных, шумовых и других возмущений. Поэтому и для оценки устойчивости рабочего процесса обычно вводят в камеру сгорания искусственные возмущения. Сильные возмущения давления в камере, например, генерируются с помощью внутрикамерных возмущающих устройств (ВВУ), внешних импульсных устройств (ВИУ) или направленного вдува газа (НВГ) [1]. Однако ввод в камеру искусственных возмущений неизбежно сопровождается искажением самого процесса, т.к. в камеру при этом поступают инородные газы, свойства которых отличаются от свойств продуктов сгорания. К тому же использование для этого специальных устройств типа ВВУ, ВИУ или НВГ, которые пока еще сложны по конструкции, одноразовы по срабатыванию и требуют специализированного препарирования камеры, делает отмеченный метод оценки устойчивости процесса к жесткому возбуждению колебаний трудоемким, требующим большого числа испытаний на различных режимах при различных уровнях вводимых возмущений.

Обсуждению возможности определения режимов жесткого возбуждения высокочастотных колебаний давления в камере сгорания в модельных условиях без ввода каких-либо импульсных или шумовых возмущений и посвящена предлагаемая статья.

Известно, что зоны жесткого возбуждения колебаний находятся вблизи зон мягкого возбуждения колебаний. Протяженность зоны жесткого возбуждения колебаний характеризуется протяженностью гистерезиса колебаний. Гистерезис колебаний, т.е. их затягивание, отмечается при прохождении зоны неустойчивости в прямом и обратном направлении.

С целью изучения гистерезисных явлений авторами проведены специальные экспериментальные исследования камеры сгорания в модельных условиях при $P_k \approx 1$ атм. При этом были поставлены следующие задачи:

- 1) экспериментально определить и сравнить границы гистерезиса и жесткого возбуждения колебаний;
- 2) исследовать воспроизводимость границы гистерезиса;
- 3) экспериментально определить и сравнить протяженность гистерезиса как ниже, так и выше зоны мягкого возбуждения колебаний;
- 4) выявить зависимость протяженности гистерезиса от типа смесеобразования, от основных параметров камеры.

Граница гистерезиса определялась путем ввода камеры в зону мягкого возбуждения колебаний с последующим плавным уводом ее из зоны неустойчивости до режима прекращения колебаний (рис.1). Такая операция производилась при двух-трех значениях исходного коэффициента избытка окислителя. В результате определялась как граница мягкого возбуждения, так и граница гистерезиса в координатах: скорость окислительного газа в каналах форсунок - коэффициент избытка окислителя (рис.3, 5). Затем камера вновь вводилась в выделенную зону гистерезиса и на нескольких режимах, разных по удаленности от границы мягкого возбуждения, в нее подавалось импульсное возмущение при помощи специального устройства.

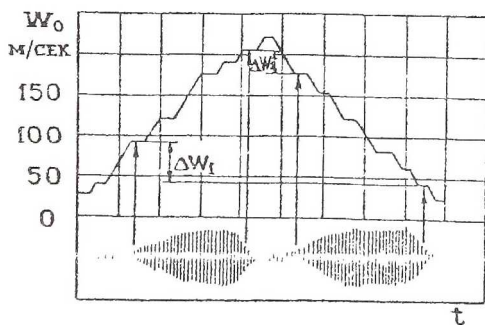


Рис.1. Сопоставление изменения амплитуды колебаний с изменением режима работы модельной камеры при прямом и обратном прохождении области неустойчивости:

ΔW_1 и ΔW_2 - протяженность нижнего и верхнего гистерезиса колебаний по скорости окислительного газа в форсунках

В результате выявлено, что возбуждение высокочастотных колебаний вблизи границы неустойчивости происходило при подаче возмущений меньшей величины, чем вдали от границы. На режимах же ниже границы гистерезиса колебания не возбуждались совсем. Таким образом описанные эксперименты достаточно убедительно подтверждают правомерность принятия границы гистерезиса за границу жесткого возбуждения колебаний.

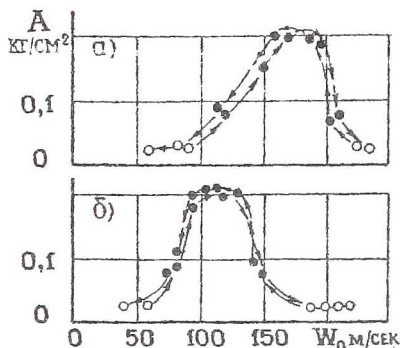


Рис. 2. Изменение амплитуды колебаний давления в модельной камере с форсунками внешнего смещения при прямом и обратном прохождении области неустойчивости: а) $\alpha_{нач} = 0,63$; б) $\alpha_{нач} = 0,75$

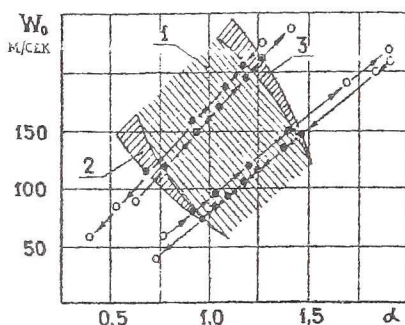


Рис. 3. Области мягкого (1) и жесткого (2,3) возбуждения колебаний в модельной камере с форсунками внешнего смещения

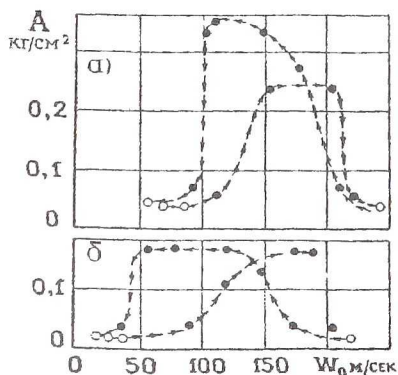


Рис. 4. Изменение амплитуды колебаний давления в модельной камере с форсунками внутреннего смещения при прямом и обратном прохождении области неустойчивости: а) $\alpha_{нач} = 0,5$; б) $\alpha_{нач} = 0,7$

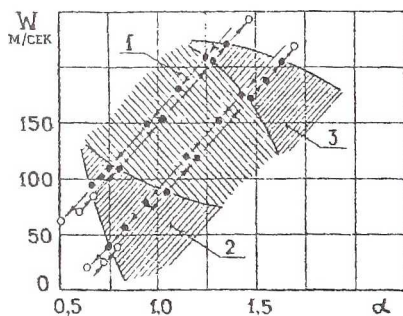


Рис. 5. Области мягкого (1) и жесткого (2,3) возбуждения колебаний в модельной камере с форсунками внутреннего смещения

Повторное определение границы гистерезиса на одинаковых режимах работы камеры показало хорошую ее воспроизводимость. Поэтому мнение о нестабильности, нерегулярности и невоспроизводимости явления жесткого возбуждения колебаний должно относиться не к границе жесткого возбуждения, а к причинам, вызывающим такое возбуждение колебаний.

При модельных испытаниях камер сгорания в условиях $P_k \approx 1$ атм представляется возможность не только вводить их на режимах неустойчивости, длительное время работать на этих режимах, но и проходить всю зону неустойчивости вплоть до верхнего режима прекращения колебаний. При этом определены зоны гистерезиса как ниже, так и выше зоны мягкого возбуждения колебаний.

Подобные исследования проведены авторами для камер сгорания с различными вариантами форсуночных головок. На рис. 3 и 5 показаны примеры изменения режима работы модельной камеры при достижении границ мягкого и жесткого возбуждения колебаний. На рис. 2 и 4 приведены характеристики изменения амплитуды колебаний при достижении границы мягкого возбуждения на режимах неустойчивости и при снижении режима работы вплоть до прекращения колебаний (до границы гистерезиса). Из рассмотрения этих рисунков следует, что амплитуда колебаний на режиме неустойчивости оказывается различной при различных значениях коэффициента избытка окислителя. В некоторых случаях амплитуда колебаний при выходе камеры из зоны неустойчивости и прохождении зоны гистерезиса существенно увеличивается (рис. 4).

Исследования, проведенные на модельной установке, показывают также, что протяженность зон гистерезиса существенно зависит от типа смесеобразования. Так протяженность гистерезиса колебаний в камере с двухкомпонентными форсунками внутреннего смещения значительно больше, чем в камере с разно компонентными форсунками внешнего смещения (рис. 3 и 5). Причем протяженность нижней и верхней области гистерезиса для каждого конкретного варианта смесеобразования оказались примерно одинаковыми (рис. 3 и 5).

Анализ натурных испытаний двигателя НК-39 и его прототипа, проведенных в ранний период их отработки, подтверждают отмеченную закономерность. При возникновении высокочастотных колебаний давления в камерах этих двигателей последние выключались специальным прибором контроля пульсаций (ПКП). При снижении режима, вызван-

ном таким выключением двигателя, также отмечалось затягивание колебаний, т.е. их гистерезис небольшой протяженности (рис. 6), примерно такой же как и при модельных испытаниях. Определение гистерезиса в натуральных условиях возможно при условии своевременного выключения двигателя устройствами типа ПКП при превышении амплитуды колебаний заданного уровня.

Таким образом, при таком определении границы жесткого возбуждения колебаний не требуется какого-либо препарирования камеры сго-

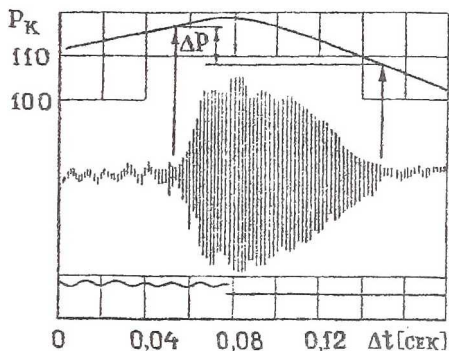


Рис. 6. Сопоставление изменения амплитуды колебаний с изменением среднего давления в камере при возникновении и прекращении неустойчивого горения на натурном огневом испытании:

ΔP - протяженность гистерезиса колебаний по давлению.

Переход волнистой линии в прямую фиксирует момент срабатывания прибора контроля пульсаций (ПКП)

рания и ввода в нее каких-либо возмущений. Причем, граница жесткого возбуждения определяется всякий раз, когда достигается граница мягкого возбуждения. Для этого достаточно иметь замеры пульсаций давления и параметров, характеризующих режимы работы камеры с регистрацией их изменения во времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неустойчивость горения в ЖРД./ Под редакцией Д.Т. Харьева и Ф.Г. Рирдона, -М.: Мир 1975.-869 с.