

## ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В НЕПРЕРЫВНО-ДЕТОНАЦИОННЫХ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ\*

В. С. Иванов<sup>1</sup>, С. С. Сергеев<sup>2</sup>, С. М. Фролов<sup>3</sup>, Ю. М. Миронов<sup>4</sup>, А. Е. Новиков<sup>5</sup>,  
И. И. Шульц<sup>4</sup>

**Аннотация:** Проведено расчетное исследование амплитудно-частотных характеристик и средних параметров сигналов, поступающих на датчики статического давления и пульсаций давления, установленные в отводящей трубке-волноводе для удаленной регистрации параметров рабочего процесса в непрерывно-детонационной кольцевой камере сгорания (НДКС). Моделируется ситуация, когда в камере сгорания происходит непрерывно-детонационный рабочий процесс с местными пульсациями давления частотой 1000 или 500 Гц, вызванными приходом детонационной волны, непрерывно вращающейся в кольцевом зазоре. Проанализировано влияние объема приемного ресивера на конце отводящей трубки-волновода и частоты пульсаций давления в камере сгорания на «показания» датчиков давления. Доказано, что удаленное размещение датчика статического давления на конце отводящей трубки-волновода позволяет регистрировать среднее по времени статическое давление в камере сгорания с точностью до 10%. Размещение датчика пульсаций давления на боковой стенке отводящей трубки-волновода позволяет надежно регистрировать частоту вращения детонационных волн.

**Ключевые слова:** непрерывно-детонационная камера сгорания; пульсации давления; удаленные датчики давления; амплитудно-частотные характеристики сигналов; среднее давление

**DOI:** 10.30826/CE20130106

### Введение

Применение НДКС — перспективный способ преобразования химической энергии топлива в тепловую или механическую энергию [1]. Значения местных давлений в НДКС — важнейший показатель рабочего процесса. Условия работы датчиков давления в НДКС очень тяжелые: датчики подвергаются воздействию высоких температур (~ 3000 °С) и давлений (до 10 МПа), а также механических вибраций. Поэтому лабораторные исследования рабочего процесса в НДКС с установкой датчиков давления непосредственно на стенках камеры, как правило, очень кратковременные (от десятых долей секунды до нескольких секунд), чтобы исключить их поломку [2, 3].

При более продолжительных испытаниях НДКС датчики давления устанавливаются в отводящих трубках-волноводах или в приемных ресиверах на их концах (рис. 1) [4, 5]. Это, с одной стороны, позволяет защитить датчики от высоких термических и механических нагрузок, а с другой стороны, приводит к искажению характеристик сигнала

вследствие волновых явлений в системе «отводящая трубка — приемный ресивер».

Цель данной работы — расчетное исследование влияния отводящей трубки-волновода (далее — отводящей трубки) и приемного ресивера на амплитудно-частотные характеристики сигналов, поступающих на удаленные датчики пульсаций давления и статического давления. Следует отметить, что в литературе каких-либо сведений о таких исследованиях нет.

### Постановка задачи

Решение задачи основано на следующих упрощающих допущениях: течение в отводящей трубке и в приемном ресивере (см. рис. 1) осесимметричное, стенки трубки и приемного ресивера гладкие, температура стенок постоянная и равна комнатной температуре.

Рассматриваются три подхода к решению задачи: на основе применения уравнений Эйлера (невязкий газ, вариант 1), Навье—Стокса (ламинарное течение, вариант 2) и Рейнольдса (турбулентное те-

\* Работа выполнена за счет субсидии, выделенной ФИЦ ХФ РАН на выполнение государственного задания по теме 0082-2016-0011, номер государственной регистрации АААА-А17-117040610346-5.

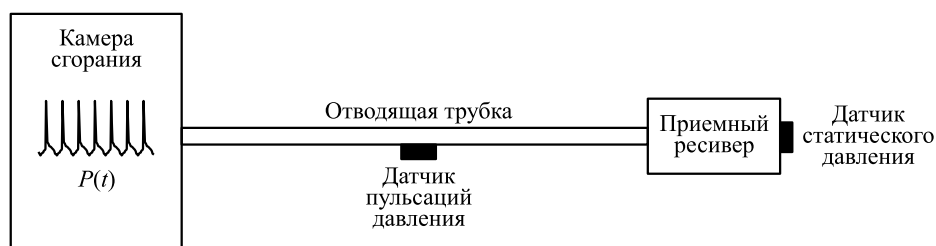
<sup>1</sup> Федеральний исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, ivanov.vls@gmail.com

<sup>2</sup> Федеральний исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, sergeev.ss@mail.ru

<sup>3</sup> Федеральний исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, smfrol@chph.ras.ru

<sup>4</sup> Акционерное общество «Военно-промышленная корпорация «НПО машиностроения», г. Реутов, Московская область, Россия, vpk@vpk.npomash.ru

<sup>5</sup> Акционерное общество «Военно-промышленная корпорация «НПО машиностроения», г. Реутов, Московская область, Россия, Novikov\_ae@vpk.npomash.ru



**Рис. 1** Схема измерения давления в НДКС с помощью удаленного датчика пульсаций давления и датчика статического давления, установленного в приемном ресивере отводящей трубки

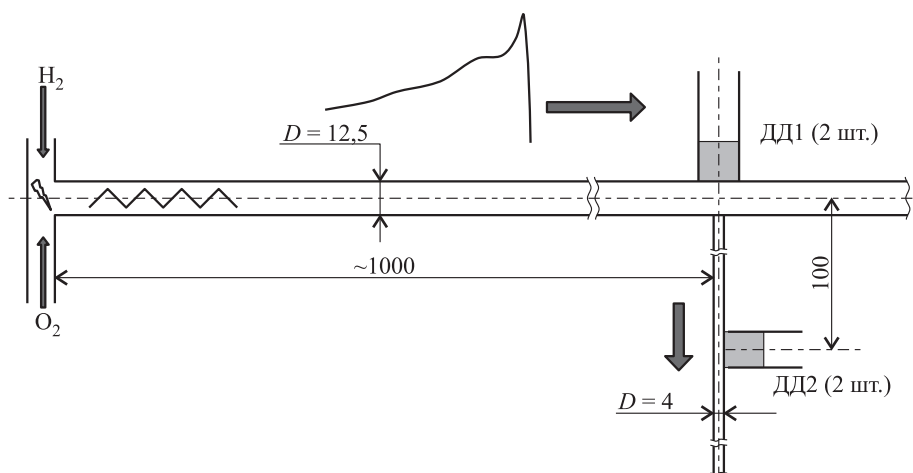
чение с  $k-\varepsilon$ -моделью турбулентности, вариант 3) с уравнением состояния идеального газа. Для экономии вычислительных ресурсов рассматривается лишь сегмент цилиндрической расчетной области (1/100 часть) с граничными условиями симметрии на боковых поверхностях сегмента. На входе в расчетную область (срез отводящей трубки со стороны НДКС) задаются изменения давления  $P(t)$  и температуры  $T(t)$  от времени  $t$ . В вариантах 1–3 на стенках отводящей трубки и приемного ресивера задаются следующие граничные условия: проскальзывания (вариант 1), прилипания (вариант 2) и прилипания с пристеночными функциями (вариант 3). Уравнения решаются методом контрольных объемов (SIMPLE — SemiImplicit Method for Pressure Linked Equations [6]) с неявным интегрированием по времени (шаг по времени 1 мкс).

## Проверка расчетной методики

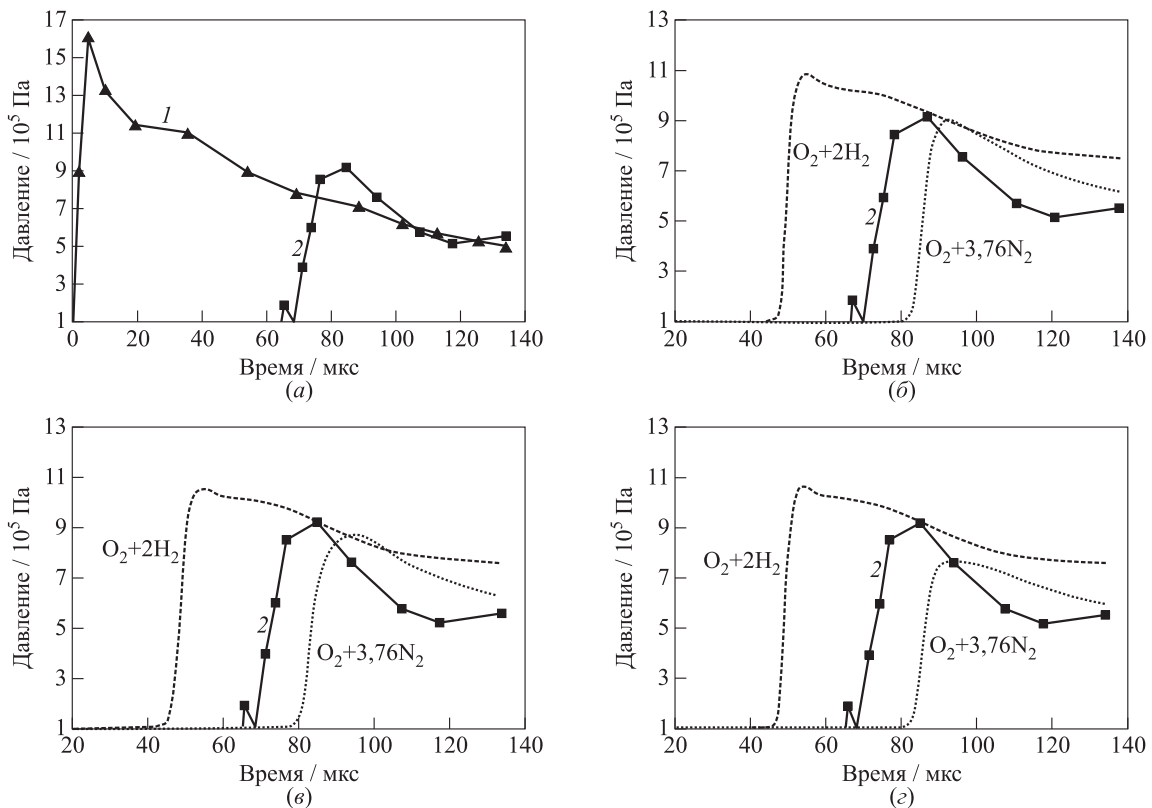
Для проверки предсказательной способности расчетной методики решена задача об изменении амплитуды и формы сигнала давления в отводящей трубке по данным эксперимента [5].

Упрощенная схема эксперимента показана на рис. 2. Экспериментальная установка представляет собой прямую детонационную трубу диаметром 12,5 мм с подводщими магистралями водорода и кислорода, свечой зажигания и спиралью Щёлкина для организации перехода горения в детонацию. На расстоянии 1 м от свечи зажигания в трубе заподлицо с внутренней стенкой установлены два высокочастотных датчика давления ДД1 друг напротив друга, и в том же сечении к стенке трубы присоединена прямая отводящая трубка диаметром 4 мм с двумя высокочастотными датчиками давления ДД2 (на схеме разнотипные датчики показаны в одной плоскости), удаленными на 100 мм от оси детонационной трубы. Общая длина отводящей трубки 6 м. Все датчики давления идентичны (РСВ 113В26).

В опыте детонационная труба заполняется стехиометрической смесью водорода с кислородом (в течение 1 с). Затем смесь у левого конца трубы поджигается искрой. В результате ускорения образованного пламени на участке со спиралью Щёлкина происходит переход горения в детонацию, а датчики ДД1 и ДД2 регистрируют изменение



**Рис. 2** Схема экспериментальной установки [5]. Размеры указаны в миллиметрах



**Рис. 3** Сравнение экспериментально измеренных (а) и расчетных (пунктирные кривые) зависимостей давления от времени, полученных на основе уравнений Эйлера (б), Навье–Стокса (в) и Рейнольдса (г): 1 — эксперимент, ДД1; 2 — эксперимент, ДД2

давления в точках установки. При обработке эксперимента показания однотипных датчиков давления усредняются.

В расчетах во входном сечении отводящей трубки задается давление  $P(t)$ , записанное датчиком ДД1 в эксперименте. Кроме того, для определенности считается, что вещество во входном сечении отводящей трубки — водяной пар (продукты сгорания стехиометрической водородно-кислородной смеси) с температурой  $T(t) = const = 2500$  К.

Из описания эксперимента в [5] неясно, чем заполнена отводящая трубка: воздухом или полностью/частично водородно-кислородной смесью. Поэтому расчеты проводятся для двух предельных случаев: (1) отводящая трубка полностью заполнена воздухом и (2) она полностью заполнена нереагирующей водородно-кислородной смесью. Расчетная сетка равномерная и содержит 10 000 ячеек. Минимальный размер ячейки 0,2 мм. Предварительное исследование показывает, что выбранная расчетная сетка обеспечивает сеточную независимость получаемых результатов.

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными для трех вариантов постановки задачи представлено на рис. 3. В эксперименте на

датчик ДД1 приходит волна давления с амплитудой  $\sim 1,6$  МПа, а датчик ДД2 регистрирует волну давления с амплитудой  $\sim 0,9$  МПа, т. е. применение отводящей трубки занижает действительное значение давления в 1,8 раз (рис. 3, а). Если отводящая трубка заполнена водородно-кислородной смесью, то в расчете волна давления во всех трех вариантах приходит на датчик ДД2 несколько раньше и с большей амплитудой, чем в эксперименте (это связано с более высокой скоростью звука в водородно-кислородной смеси, чем в воздухе). Если же отводящая трубка заполнена воздухом, то расчетная волна давления во всех трех вариантах приходит на датчик ДД2 несколько позже и с меньшей амплитудой, чем в эксперименте.

Исходя из того что экспериментальная кривая расположена между расчетными кривыми для водородно-кислородной смеси и для воздуха, а ее амплитуда принимает промежуточное значение между амплитудами расчетных кривых, можно считать, что в целом расчет удовлетворительно согласуется с экспериментом. Более того, на основе сравнения расчетов с экспериментом можно предположить, что во время продувки детонационной трубки водородно-кислородной смесью эта смесь запол-

няет отводящую трубку лишь на небольшую длину: так, что даже передача детонации в отводящую трубку не оказывает заметного влияния на сигнал, регистрируемый датчиком ДД2.

По времени прихода и амплитуде волны давления расчеты с невязким (рис. 3, б) и с ламинарным (рис. 3, в) течением в отводящей трубке с экспериментом согласуются лучше, чем расчет с турбулентным течением (рис. 3, г).

## Параметрические расчеты

Ниже приведены результаты параметрических расчетов на основе уравнений Навье–Стокса для

конфигурации измерительной системы, показанной на рис. 4, с отводящей трубкой диаметром 4 мм и длиной 2 м и двумя вариантами приемного ресивера на конце отводящей трубки: объемом  $1 \text{ см}^3$  ( $1 \times 1 \times 1 \text{ см}$ ) и объемом  $125 \text{ см}^3$  ( $5 \times 5 \times 5 \text{ см}$ ).

Параметрические расчеты проводятся для имитации рабочего процесса в НДКС: во входном сечении отводящей трубки задается продолжительная последовательность одинаковых импульсов давления с частотой  $f$  и средним по времени статическим давлением в НДКС  $\bar{P}$  (рис. 5, а). Эта последовательность импульсов получена в трехмерных расчетах рабочего процесса в НДКС [7]. Аналогичным образом задаются пульсации температуры

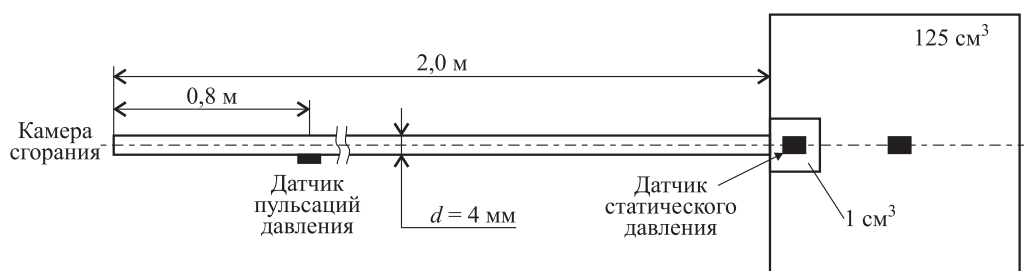


Рис. 4 Геометрия расчетной области

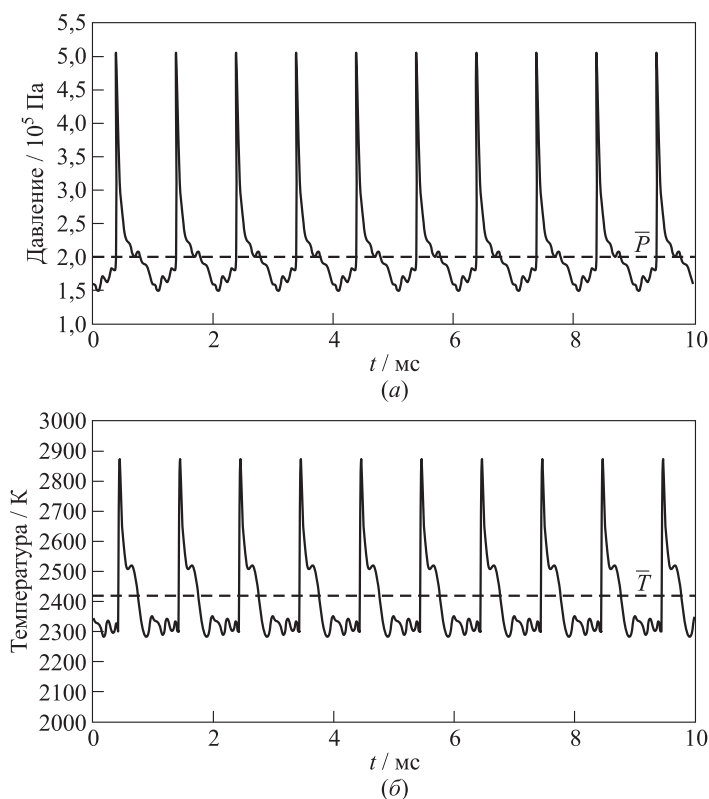


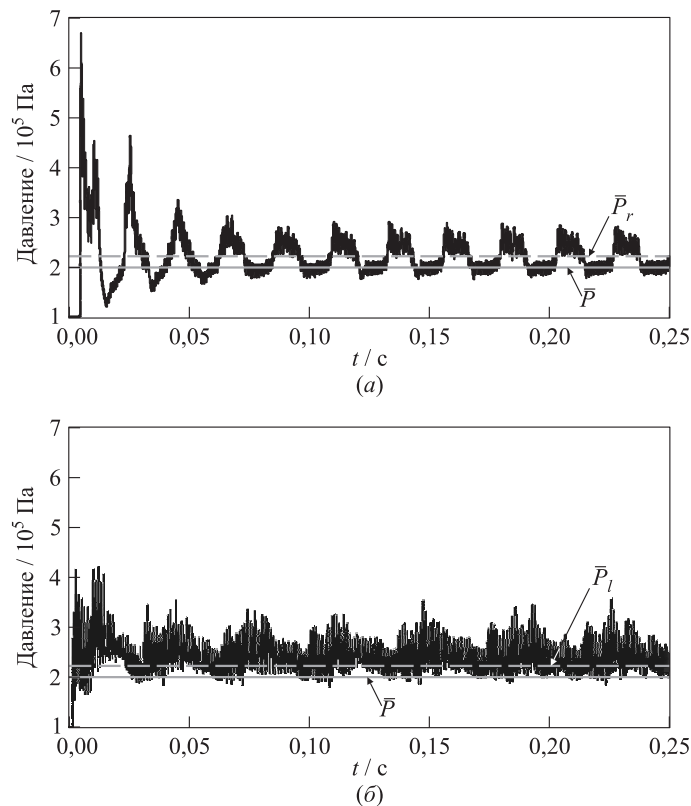
Рис. 5 Пульсации давления (а) и температуры (б) на входе в отводящую трубку для рабочего процесса в НДКС с частотой 1 кГц

(рис. 5, б). Максимальное значение температуры в пульсациях — около 2850 К, а среднее значение  $\bar{T} \approx 2400$  К. Система «отводящая трубка — приемный ресивер» заполнена воздухом при нормальных условиях ( $P_0 = 0,1$  МПа). Расчет дает «записи» (или «показания») датчика давления, расположенного в приемном ресивере, и датчика давления, размещенного на боковой поверхности отводящей трубки на расстоянии 0,8 м от ее входного сечения. Для определенности первый из указанных датчиков будем называть датчиком статического давления, а второй — датчиком пульсаций давления. Расчетный «шаг опроса» обоих датчиков давления равен шагу интегрирования по времени (1 мкс).

На рис. 6 показаны такие записи датчика статического давления (рис. 6, а) и датчика пульсаций давления (рис. 6, б) при объеме приемного ресивера 1 см<sup>3</sup>. Осциллирующая кривая на рис. 6, а — расчетная зависимость среднего по объему статического давления в ресивере (запись датчика статического давления). Обращает на себя внимание низкочастотная модуляция колебаний среднего давления, отсутствующая в исходном сигнале (см. рис. 5). Штриховая горизонтальная прямая

показывает среднее по времени давление в приемном ресивере ( $\bar{P}_r$ ). Для сравнения сплошная горизонтальная прямая показывает среднее по времени статическое давление в НДКС ( $\bar{P}$ ). Видно, что при установившемся периодическом процессе (по прошествии времени  $\sim 100$  мс) минимальное значение среднего давления в ресивере ( $\sim 0,18$  МПа) на 20% выше минимального значения в исходном сигнале (0,15 МПа), а максимальное давление в 1,85 раза меньше максимального давления в НДКС. Среднее по времени давление в приемном ресивере на 9% выше среднего давления в НДКС, но  $\bar{P}_r \approx \bar{P}$ .

Что касается датчика пульсаций давления (см. рис. 6, б), то его показания тоже отличаются от исходного сигнала: видна низкочастотная модуляция пульсаций давления, но среднее по времени местное давление  $\bar{P}_l$  выше среднего давления в НДКС на 6%, но  $\bar{P}_l \approx \bar{P}$ . На оба датчика искаженный сигнал приходит с некоторым запаздыванием. Чтобы понять, почему средние значения давления  $\bar{P}_r$  и  $\bar{P}_l$  оказываются выше, чем среднее давление в исходном сигнале, проведены расчеты с заменой приемного ресивера на неотражающие граничные условия в конце отводящей трубки. В качестве



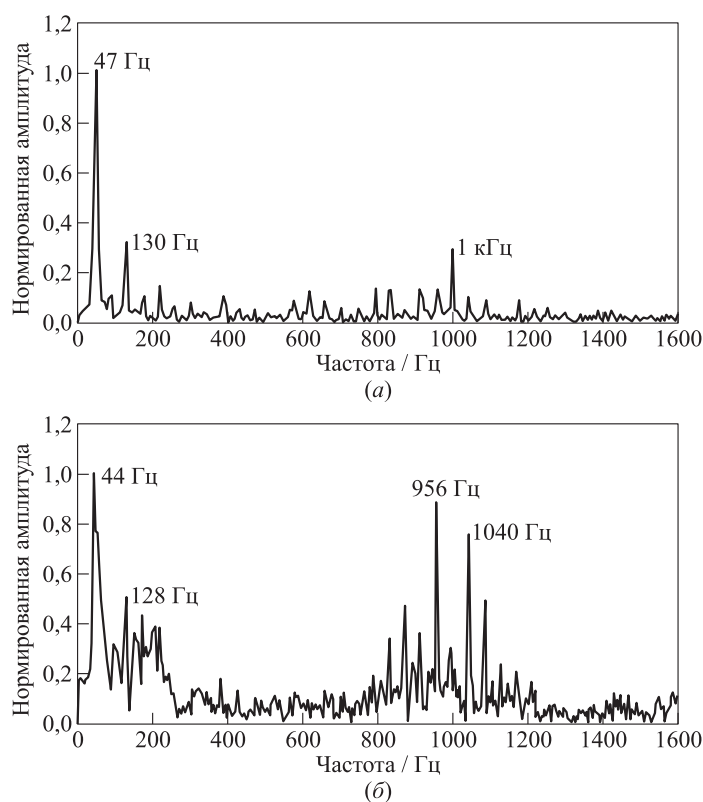
**Рис. 6** Расчетные записи датчика статического давления в приемном ресивере объемом 1 см<sup>3</sup> (а) и датчика пульсаций давления (б) при частоте рабочего процесса в НДКС 1 кГц (начальное давление в системе «отводящая трубка — приемный ресивер» 0,1 МПа)

неотражающих условий выбраны условия, предложенные в [8, 9]. Расчеты показали, что повышение среднего давления  $\bar{P}_r$  и  $\bar{P}_l$  связано с приходом отраженных волн давления из приемного ресивера: использование неотражающих граничных условий приводит к небольшому снижению среднего давления  $\bar{P}_r$  и  $\bar{P}_l$ .

На рис. 7 показаны результаты частотного анализа пульсаций на записях датчика статического давления (рис. 7, а) и датчика пульсаций давления (рис. 7, б) в рассматриваемом примере. На рис. 7, а выделяются три главные гармоники: две низкочастотные и одна высокочастотная. Первая низкочастотная гармоника с частотой 47 Гц соответствует частоте периодического изменения давления в приемном ресивере, а вторая низкочастотная гармоника (130 Гц) близка к частоте собственных колебаний, вычисленной по формуле для системы «отводящая трубка – приемный ресивер» (124 Гц) [10]. Третья высокочастотная гармоника имеет частоту  $f_r$ , равную частоте рабочего процесса в НДКС ( $f_r \approx f = 1$  кГц). Полученный результат означает, что и среднее давление  $\bar{P}_r$ , и частота пульсаций давления  $f_r$  в приемном ресивере, присоединенном

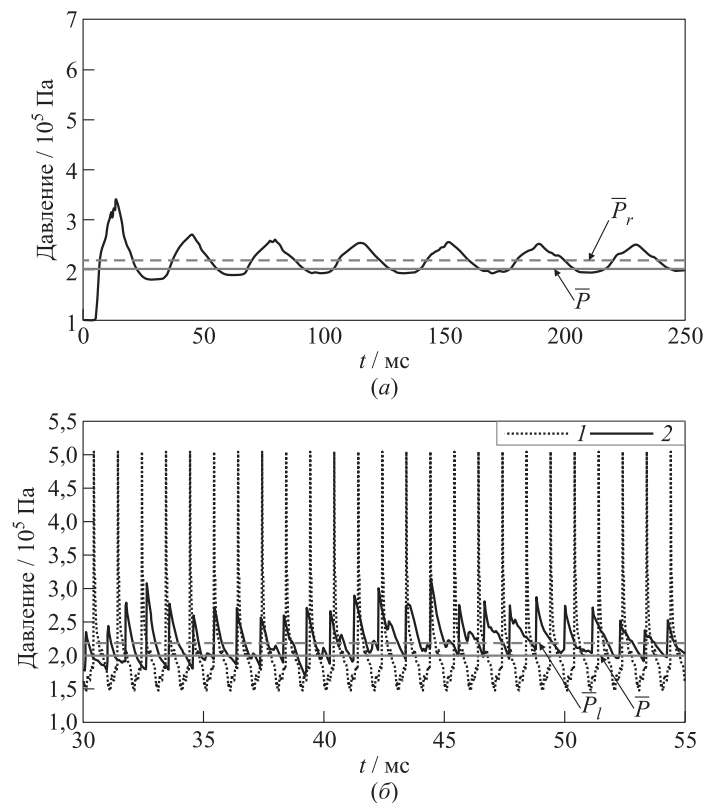
к отводящей трубке, близки к среднему давлению и к частоте исходного сигнала соответственно. Однако амплитуды и формы сигналов на входе и выходе отводящей трубки отличаются друг от друга значительно. Что касается частотного спектра пульсаций давления на рис. 7, б, то в нем выделяются те же гармоники, что и на рис. 7, а, однако они не так явно выражены. В высокочастотной части спектра выделяются две главные гармоники с частотами 956 и 1040 Гц, близкими к частоте рабочего процесса (1 кГц).

При использовании приемного ресивера большего объема (125 см<sup>3</sup>) максимальное давление на записи датчика статического давления снижается, а высокочастотные пульсации давления сглаживаются (рис. 8, а). Видно, что при установившемся периодическом процессе (по прошествии времени  $\sim 100$  мс) минимальное значение давления в ресивере ( $\sim 0,19$  МПа) на 27% выше минимального значения в исходном сигнале (0,15 МПа), а максимальное давление в 2 раза меньше максимального давления в НДКС. Среднее по времени давление в приемном ресивере приблизительно на 8% выше среднего давления в НДКС, но



**Рис. 7** Частотные характеристики расчетных записей датчика статического давления в приемном ресивере объемом 1 см<sup>3</sup> (а) и датчика пульсаций давления (б) при частоте рабочего процесса в НДКС 1 кГц (начальное давление в системе «отводящая трубка – приемный ресивер» 0,1 МПа)





**Рис. 8** Расчетные записи датчика статического давления в приемном ресивере объемом  $125 \text{ см}^3$  (а) и датчика пульсаций давления (б) (начальное давление в системе «отводящая трубка – приемный ресивер»  $0,1 \text{ МПа}$ ): 1 — мгновенное местное статическое давление в НДКС; 2 — мгновенное статическое давление в точке  $x = 0,8 \text{ м}$

$\bar{P}_r \approx \bar{P}$ . Что касается датчика пульсаций давления (рис. 8, б), то его показания тоже отличаются от исходного сигнала, а среднее по времени местное давление  $\bar{P}_l$  выше среднего давления в НДКС приблизительно на 10%.

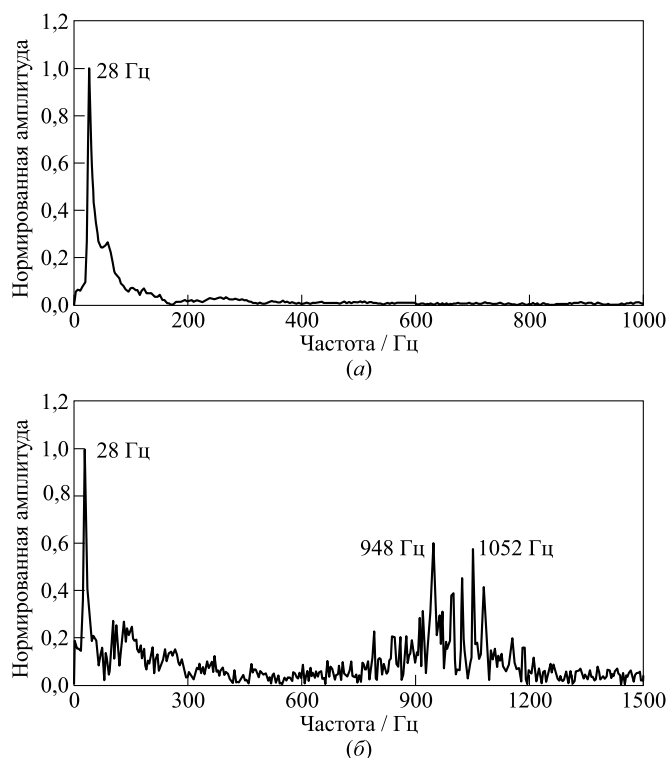
Интересно, что частотный анализ установившегося периодического процесса в приемном ресивере объемом  $125 \text{ см}^3$  (рис. 9, а) показывает наличие только одной главной гармоники с частотой 28 Гц, а гармоники с частотой собственных колебаний в системе «отводящая трубка – приемный ресивер» (11 Гц) и с частотой рабочего процесса в НДКС (1 кГц) вообще отсутствуют. В отличие от записи датчика статического давления на записи датчика пульсаций давления (рис. 9, б) выделяется набор гармоник с частотами, близкими к частоте рабочего процесса в НДКС: 948 и 1052 Гц, т. е. датчик пульсаций давления достаточно точно отображает частоту рабочего процесса.

Чтобы дополнительно проверить связь между частотой пульсаций на входе в отводящую трубку с частотой пульсаций давления в приемном ресивере, нами выполнены расчеты с другой, в два раза меньшей, частотой рабочего процесса в НДКС, равной 500 Гц. Для получения

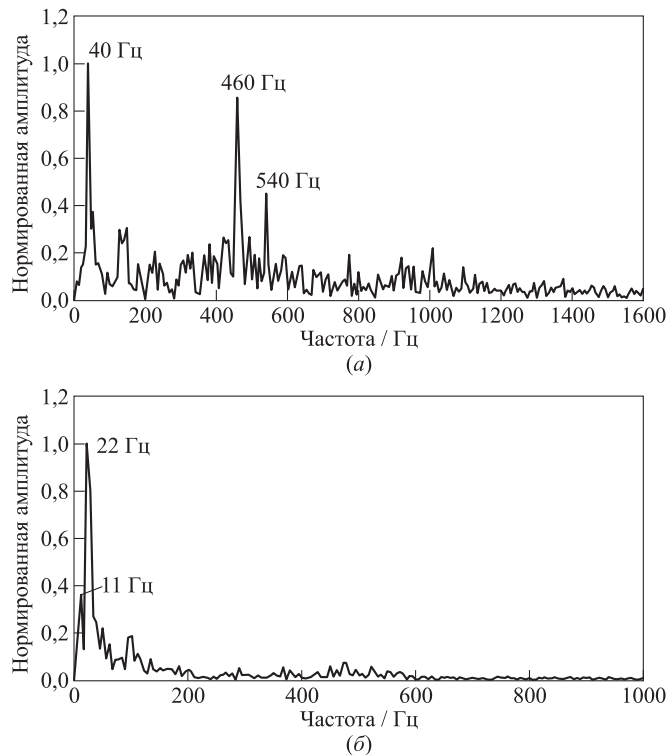
такой частоты входной сигнал (см. рис. 5) растянут по временной оси в два раза. Расчеты с новой частотой выполнены для двух рассмотренных выше объемов приемного ресивера: 1 и  $125 \text{ см}^3$ . Результаты расчетов представлены на рис. 10 в виде соответствующих частотных характеристик. В обоих случаях получено некоторое снижение частот главных гармоник: для ресивера малого объема — 40 Гц вместо 47 Гц (снижение на 15%), а для ресивера большего объема — 22 Гц вместо 28 Гц (снижение на 21%). Примечательно, что для ресивера большего объема проявляется частота собственных колебаний в системе «отводящая трубка – приемный ресивер» (11 Гц). В приемном ресивере объемом  $1 \text{ см}^3$  выделяются две главные гармоники с частотами 460 и 540 Гц, близкими к частоте рабочего процесса в НДКС (500 Гц). В приемном ресивере объемом  $125 \text{ см}^3$  две указанные гармоники с частотами 460 и 540 Гц выражены очень слабо.

## Заключение

Проведено расчетное исследование амплитудно-частотных характеристик и средних параметров сигналов, поступающих на датчик статического



**Рис. 9** Частотные характеристики расчетных записей датчика статического давления в приемном ресивере объемом  $125 \text{ см}^3$  (а) и датчика пульсаций давления (б) при частоте рабочего процесса в НДКС 1 кГц (начальное давление в системе «отводящая трубка – приемный ресивер» 0,1 МПа)



**Рис. 10** Частотные характеристики расчетных записей датчика статического давления в приемном ресивере объемом  $1 \text{ см}^3$  (а) и  $125 \text{ см}^3$  (б) при частоте рабочего процесса в НДКС 500 Гц (начальное давление в системе «отводящая трубка – приемный ресивер» 0,1 МПа)



давления, установленный в приемном ресивере отводящей трубки и на датчик пульсаций давления, установленный на боковой поверхности отводящей трубки, для удаленной регистрации параметров рабочего процесса в НДКС. Используются три подхода к решению задачи: на основе применения уравнений Эйлера (невязкий газ), Навье–Стокса (ламинарное течение) и Рейнольдса (турбулентное течение с  $k-\varepsilon$ -моделью турбулентности) с уравнением состояния идеального газа. Применение указанных подходов к описанию известных экспериментов показало, что наилучшее согласие с экспериментом достигается при использовании модели невязкого или ламинарного течения в отводящей трубке.

С помощью модели ламинарного течения далее моделируется ситуация, когда в кольцевой камере сгорания происходит непрерывно-детонационный рабочий процесс с местными пульсациями давления частотой 1000 или 500 Гц, вызванными приходом детонационной волны, непрерывно вращающейся в кольцевом зазоре. Проанализировано влияние объема приемного ресивера в системе «отводящая трубка – приемный ресивер» и частоты пульсаций давления в камере сгорания на показания датчиков. Показано, что после установления периодического колебательного процесса в системе «отводящая трубка – приемный ресивер» среднее по времени давление на записи датчика статического давления приблизительно на 10% выше среднего по времени статического давления в НДКС. При малом объеме приемного ресивера (на уровне  $1 \text{ см}^3$ ) в частотном спектре сигнала, поступающего на датчик статического давления, имеется гармоника, соответствующая или близкая к частоте исходного сигнала. При большом объеме приемного ресивера (на уровне  $125 \text{ см}^3$ ) такая гармоника либо отсутствует, либо очень слабо выражена. В отличие от записи датчика статического давления на записи датчика пульсаций давления как при малом, так и при больших объемах приемного ресивера выделяется набор гармоник с частотами, очень близкими к частоте рабочего процесса в НДКС, т. е. датчик пульсаций давления достаточно точно отображает частоту рабочего процесса.

Результаты проведенного исследования показывают, что удаленное размещение датчиков статического давления на закрытых концах отводящих

трубок позволяет регистрировать среднее по времени статическое давление в камере сгорания, причем регистрируемое среднее давление приблизительно на 10% выше, чем в исходном сигнале. Определять частоту вращения детонационных волн по показаниям датчиков статического давления проблематично. Частоту вращения детонационных волн можно достаточно надежно определять по показаниям датчиков пульсаций давления.

## Литература

1. Advances in pulsed and continuous detonations / Ed. S. M. Frolov — Moscow: TORUS PRESS, 2019. 448 p.
2. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Самсонов А. Н., Сычев А. И., Тарнайкин А. Е. Измерение давления в камере сгорания малоинерционными пьезодатчиками при непрерывной спиновой детонации // Физика горения и взрыва, 2017. № 1. С. 75–83.
3. Фролов С. М., Аксенов В. С., Иванов В. С., Медведев С. Н., Шамшин И. О., Яковлев Н. Н., Костенко И. И. Ракетный двигатель с непрерывно-детонационным горением топливной пары «природный газ – кислород» // Докл. Акад. наук, 2018. Т. 478. № 4. С. 429–433.
4. Li G., Gutmark E. Effects of installation on dynamic pressure measurements. AIAA Paper No. 2006-1387, 2006.
5. Geji R. M., Walters I. V., Beard S., et al. Transducer installation effects on pressure measurements in PGC devices. AIAA Paper No. 2018-0158, 2018. doi: 10.2514/6.2018-0158.
6. Patankar S. V., Spalding D. B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows // Int. J. Heat Mass Tran., 1972. Vol. 15. No. 1. P. 1510–1520.
7. Дубровский А. В., Иванов В. С., Зангиев А. Э., Фролов С. М. Трехмерное численное моделирование характеристик прямоточной воздушно-реактивной силовой установки с непрерывно-детонационной камерой сгорания в условиях сверхзвукового полета // Хим. физика, 2016. Т. 35. № 6. С. 49–63. doi: 10.7868/S0207401X16060042.
8. Фролов С. М., Басевич В. Я., Беляев А. А., Посвянский В. С., Радвогин Ю. Б. Моделирование стабилизации пламени в турбулентном потоке // Хим. физика, 1999. Т. 18. № 3. С. 86–99.
9. Фролов С. М., Басевич В. Я., Беляев А. А. Механизм стабилизации турбулентного пламени на плохообтекаемом теле // Хим. физика, 1999. Т. 18. № 8. С. 50–61.
10. Olson, H. F. Acoustical engineering. — New York, NY, USA, 1957. 781 p.

Поступила в редакцию 11.11.2019

## ON PRESSURE MEASUREMENTS IN CONTINUOUS-DETONATION COMBUSTORS

V. S. Ivanov<sup>1</sup>, S. S. Sergeev<sup>1</sup>, S. M. Frolov<sup>1</sup>, Yu. M. Mironov<sup>2</sup>, A. E. Novikov<sup>2</sup>, and I. I. Schulz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

<sup>2</sup>Joint-Stock Company “Military-Industrial Corporation NPO mashinostroeniya,” 33 Gagarina Str., Reutov, Moscow Region 143966, Russian Federation

**Abstract:** A computational study of the amplitude-frequency characteristics and time-averaged parameters of the signal supplied to a static pressure sensor and a sensor of pressure pulsations installed in the waveguide tube for remote recording of the parameters of the operation process in a continuous-detonation annular combustor is performed. The situation is simulated when a continuous-detonation operation process occurs in the combustor with local pressure pulsations at a frequency of 1000 or 500 Hz, caused by the arrival of a detonation wave continuously rotating in the annular gap. The influence of the volume of the receiver at the end of the waveguide tube and the frequency of pressure pulsations in the combustor on the readings of the pressure sensors is analyzed. It is shown that the remote placement of static pressure sensors at the ends of the waveguide tubes allows the time-averaged static pressure in the combustor to be recorded with an accuracy of  $\sim 10\%$ . The rotation frequency of detonation waves can be reliably measured by sensors of pressure pulsations installed at the lateral wall of the waveguide tube.

**Keywords:** continuous-detonation combustor; pressure pulsations; remote pressure sensor; amplitude-frequency characteristics of a signal; time-averaged pressure

**DOI:** 10.30826/CE20130106

### Figure Captions

**Figure 1** Schematic of pressure measurement in a PDE/RDE combustor with the remote sensors of pressure pulsations and/or static pressure sensors mounted in the waveguide tube and at its end

**Figure 2** Schematic of the experiment [5]

**Figure 3** Pressure histories measured by sensors PS1 and PS2 (a) and predicted pressure histories by Euler (b), Navier–Stokes (c), and Reynolds equations (d)

**Figure 4** Schematic of pressure measurement in RDE combustor with the remote sensors of pressure pulsations and/or static pressure sensors mounted in the waveguide tube and at its end

**Figure 5** Examples of predicted time histories of static pressure (a) and static temperature (b) at the inlet of the waveguide tube;  $f_{\text{in}} = 1000$  Hz

**Figure 6** Calculated time histories of mean static pressure  $\bar{P}_r$  (a) and local instantaneous pressure  $P_l$  in the waveguide tube – small receiver system (b);  $f_{\text{in}} = 1000$  Hz;  $P_0 = 0.1$  MPa; and  $V = 1$  cm<sup>3</sup>

**Figure 7** Fourier transform of  $\bar{P}_r(t)$  (a) and  $P_l(t)$  curves (b) for the waveguide tube – small receiver system;  $f_{\text{in}} = 1000$  Hz;  $P_0 = 0.1$  MPa; and  $V = 1$  cm<sup>3</sup>

**Figure 8** Calculated time histories of mean static pressure  $\bar{P}_r$  (a) and local instantaneous pressure  $P_l$  (b) in the waveguide tube – large receiver system;  $f_{\text{in}} = 1000$  Hz;  $P_0 = 0.1$  MPa; and  $V = 125$  cm<sup>3</sup>

**Figure 9** Fourier transform of  $\bar{P}_r(t)$  (a) and  $P_l(t)$  curves (b) for the waveguide tube – large receiver system;  $f_{\text{in}} = 500$  Hz;  $P_0 = 0.1$  MPa; and  $V = 125$  cm<sup>3</sup>

**Figure 10** Fourier transform of  $\bar{P}_r(t)$  curve for the waveguide tube – small receiver system ( $f_{\text{in}} = 500$  Hz and  $P_0 = 0.1$  MPa): (a)  $V = 1$  cm<sup>3</sup>; and (b)  $V = 125$  cm<sup>3</sup>

### Acknowledgments

This work was supported by the subsidy given to the N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences to implement the state assignment on the topic No. 0082-2016-0011 (Registration No. AAAA-A17-117040610346-5).

## References

1. Frolov, S. M., ed. 2019. *Advances in pulsed and continuous detonations*. Moscow: TORUS PRESS. 448 p.
2. Bykovskii, F. A., S. A. Zhdan, E. F. Vedernikov, A. N. Samsonov, A. I. Sychev, and A. E. Tarnaikin. 2017. Pressure measurement by fast-response piezo-electric sensors during continuous spin detonation in the combustor. *Combust. Expl. Shock Waves* 53:65–73.
3. Frolov, S. M., V. S. Aksenov, V. S. Ivanov, S. N. Medvedev, I. O. Shamshin, N. N. Yakovlev, and I. I. Kostenko. 2018. Rocket engine with continuous detonation combustion of the natural gas–oxygen propellant system. *Dokl. Phys. Chem.* 478(2):31–34. doi: 10.1134/S001250161802001X.
4. Li, G., and K. Gutmark. 2006. Effects of installation on dynamic pressure measurements. AIAA Paper No. 2006-1387.
5. Gejji, R., I. V. Walters, S. Beard, *et al.* 2018. Transducer installation effects on pressure measurements in PGC devices. AIAA Paper No. 2018-0158. doi: 10.2514/6.2018-0158.
6. Patankar, S. V., and D. B. Spalding. 1972. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *Int. J. Heat Mass Tran.* 15(1):1510–1520.
7. Dubrovskii, A. V., V. S. Ivanov, A. E. Zangiev, and S. M. Frolov. 2016. Three-dimensional numerical simulation of the characteristics of a ramjet power plant with a continuous-detonation combustor in supersonic flight. *Russ. J. Phys. Chem. B* 10(3):469–482. doi: 10.1134/S1990793116030179.
8. Frolov, S. M., V. Ya. Basevich, A. A. Belyaev, V. S. Posvyanskii, and Yu. B. Radvogin. 1999. Simulation of flame stabilization in a turbulent flow. *Chem. Phys. Reports* 18(3):569–598.
9. Frolov, S. M., V. Ya. Basevich, and A. A. Belyaev. 2000. Mechanism of turbulent flame stabilization on a bluff body. *Chem. Phys. Reports* 18(8):1495–1516.
10. Olson, H. F. 1957. *Acoustical engineering*. New York, NY. 781 p.

Received November 11, 2019

## Contributors

**Ivanov Vladislav S.** (b. 1986) — Doctor of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; research scientist, Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences, 36-1 Nakhimovskii Prosp., Moscow 117218, Russian Federation; ivanov.vls@gmail.com

**Sergeev Sergey S.** (b. 1985) — Candidate of Science in technology, senior research scientist, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; sergeev.ss@mail.ru

**Frolov Sergey M.** (b. 1959) — Doctor of Science in physics and mathematics, head of department, head of laboratory, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; professor, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; senior research scientist, Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences, 36-1 Nakhimovskii Prosp., Moscow 117218, Russian Federation; smfrol@chph.ras.ru

**Mironov Yurii M.** (b. 1940) — chief expert, Joint-Stock Company “Military-Industrial Corporation NPO mashinostroeniya,” 33 Gagarina Str., Reutov, Moscow Region 143966, Russian Federation; vpk@vpk.npomash.ru

**Novikov Andrei E.** (b. 1958) — Candidate of Science in technology, head of department, Joint-Stock Company “Military-Industrial Corporation NPO mashinostroeniya,” 33 Gagarina Str., Reutov, Moscow Region 143966, Russian Federation; Novikov\_ae@vpk.npomash.ru

**Shultz Iliya I.** (b. 1989) — design engineer, Joint-Stock Company “Military-Industrial Corporation NPO mashinostroeniya,” 33 Gagarina Str., Reutov, Moscow Region 143966, Russian Federation; vpk@vpk.npomash.ru