

АНАЛИЗ RANS/ILES-МЕТОДОМ ВЛИЯНИЯ ДРОССЕЛИРОВАНИЯ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В КАНАЛЕ ИЗОЛЯТОРА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВЗ

Д.А. Любимов

DALyubimov@yandex.ru

ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»

г. Москва

Мотивация работы

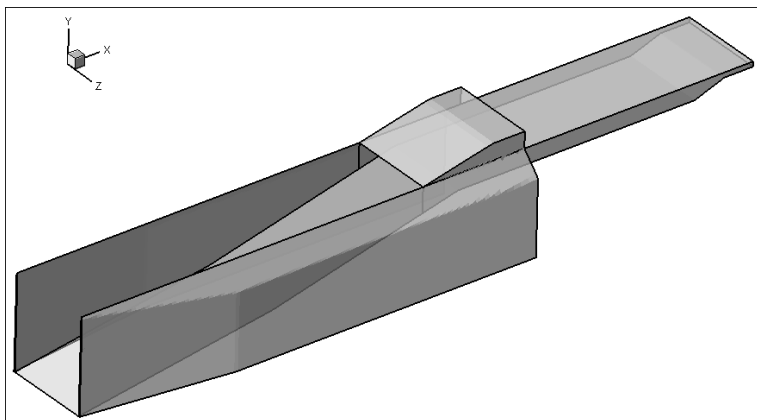
При экспериментальной отработке высокоскоростных ВЗ обычно не моделируются реальные условия полета. Прежде всего, по температуре: в эксперименте температура обычно ниже. В этом случае теплоемкость воздуха C_p близка к постоянной. В реальных условиях температура значительно выше, и сильнее проявляется зависимость теплоемкости от температуры, переменным становится показатель адиабаты γ , а это в свою очередь влияет на углы скачков уплотнения и интенсивность торможения потока в них и, как следствие уровень и спектральные свойства пульсаций давления. Расчеты также часто проводятся при постоянной γ .

Цель работы

В настоящей работе было исследовано влияние дросселирования и переменной теплоемкости C_p на особенности течения, уровень и спектральные свойства пульсаций давления в канале изолятора ВЗ с прямоугольным поперечным сечением [1] при температуре набегающего потока $T=217K$, которая соответствовала реальным условиям полета и была выше, чем в эксперименте [1]: $T=102K$.

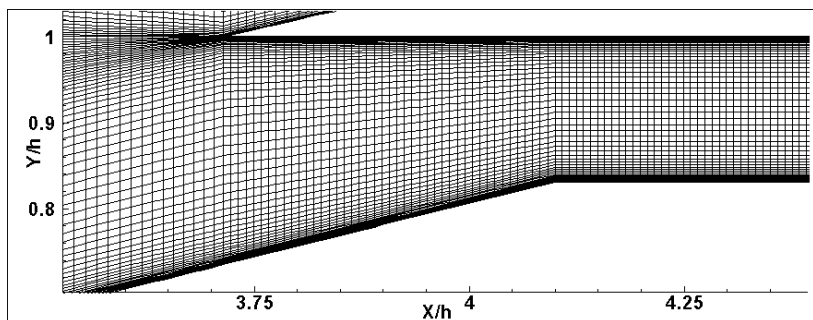
1. Li Z., Gao W., Jiang H., Yang J. Unsteady Behaviors of a Hypersonic Inlet Caused by Throttling in Shock Tunnel // AIAA J. 2013. V. 51, № 10. P. 2485- 2492.

Геометрия ВЗ, расчетная сетка, режимные параметры



Общий вид геометрии ВЗ при расчетах

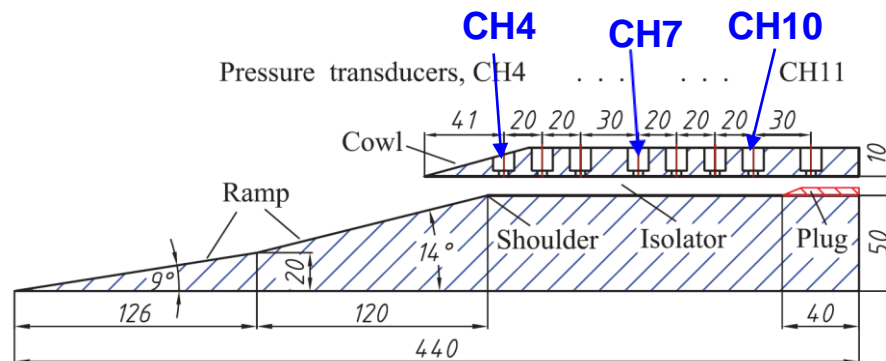
Расчетная сетка содержала
 3.32×10^6 ячеек



Фрагмент сетки около входа в изолятор

В расчетах были использованы геометрия модели ВЗ и данные эксперимента из статьи: Li Z., Gao W., Jiang H., Yang J. Unsteady Behaviors of a Hypersonic Inlet Caused by Throttling in Shock Tunnel // AIAA J. 2013. V. 51, № 10. P. 2485- 2492.

Зависимость теплоемкости от температуры аппроксимировалась степенными полиномами JANAF.



На входе число M_0 , статическое давление набегающего потока и на выходе из изолятора соответствовали эксперименту, но температура набегающего потока была выше $T_{sta}=217K$ (в эксперименте $T_{sta}=102K$) $Re=3.12 \times 10^5$.

Высота дроссельной вставки TR изменялась от 0 до $0.7H$ (H - высота канала изолятора).

Основные элементы RANS/ILES-метода (Любимов Д.А., ТВТ, 2012, Т.50, №2):

- Около стенок: URANS с моделью турбулентности Спаларта-Аллмараса.
- Вдали от них: LES с неявной SGS-моделью (ILES): схемная вязкость выполняет функции подсеточной вязкости.
- Метод Роу с уменьшенной схемной вязкостью:
- $$f_{i+1/2} = \frac{1}{2}[f(q_L)+f(q_R)] - \frac{1}{2}|A|(q_R - q_L).$$
- Для предраспадных параметров q_L и q_R на гранях ячеек использована сохраняющая монотонность схема 9-го порядка (в областях гладкого решения) MP-9 (A. Suresh, H.T. Huynh, JCP 1997, V.136).
- Граничные условия: на входных сверхзвуковых границах зафиксированы параметры потока, на стенке – функция стенки / прилипание, на выходных – статическое давление (дозвук) или снос параметров изнутри расчетной области (сверхзвук) .
- Неявная схема интегрирования по времени (dual time stepping).
- Переход к ILES достигается изменением модели турбулентности: модифицируется расстояние d до стенки в диссипативном слагаемом источникового члена уравнения модели турбулентности.

Расстояние d_{ILES} определяется следующим образом:

$$d_{ILES} = \max(d_{\Delta}, d_f), \text{ где:}$$

$$\begin{aligned} d_{\Delta} &= d, & \text{при } d \leq C_{\Delta} \Delta_{max} \\ d_{\Delta} &= 10^{-6} H, & \text{при } d > C_{\Delta} \Delta_{max} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} d_f &= df_d, & \text{при } f_d \geq f_{dmin} \\ df &= 10^{-6} H, & \text{при } f_d < f_{dmin} \end{aligned} \quad (2)$$

H – характерная величина, к которой отнесены все размеры.

Выражение для f_d в (2) имеет структуру аналогичную использованной в методе IDDES [1]:

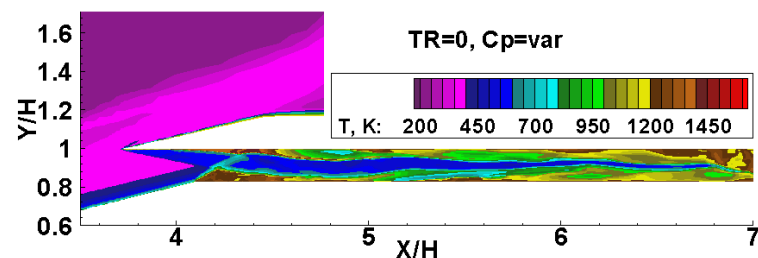
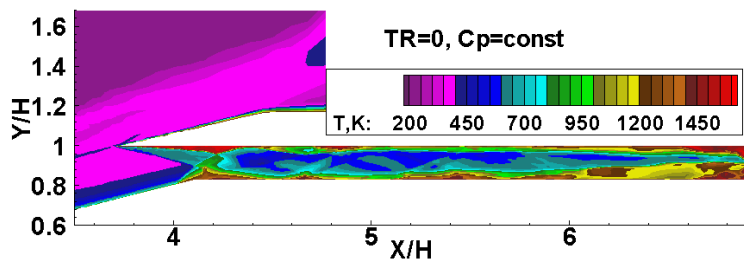
$$f_d = \max(f_{dt}, f_b)(1 + f_e \Psi) \quad (3)$$

В выражении для f_d функции f_b , f_e и Ψ такие же, как и в методе IDDES. В формуле (3) функция f_{dt} определена следующим образом:

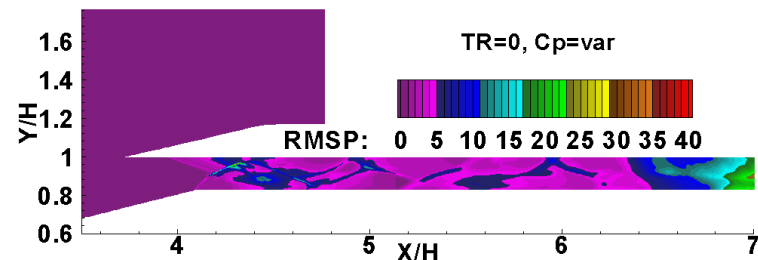
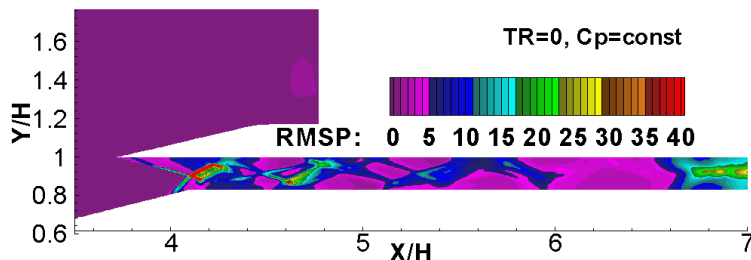
$$f_{dt} = \text{th}((C_{dt} r_{dt})^3) \quad (4)$$

В выражениях (1), (2) и (4) величины C_{Δ} , C_{dt} и f_{dmin} подбирались на основе тестовых расчетов. . Окончательные значения этих параметров равнялись соответственно: **1.0**, **8.0** и **10^{-2}** . Другие функции, входящие в (3) и (4), совпадают с аналогичными в методе IDDES [1]:

Мгновенная статическая температура

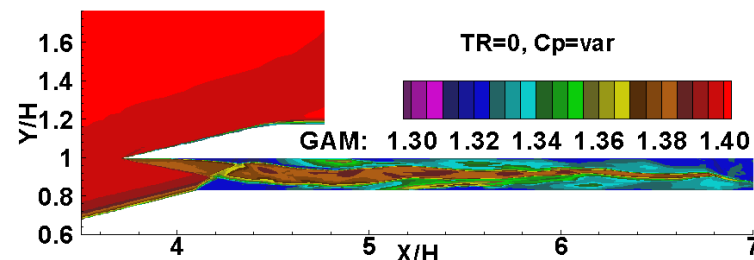


Пульсации статического давления



Наибольшее влияние переменной C_p было при малых TR на режимах, когда ВЗ запущен, и торможение потока в канале изолятора происходит в системе косых скачков уплотнения. В случае $C_p=var$ меняется структура течения в канале изолятора, а максимальная температура ниже, чем в случае с постоянной теплоемкости. В случае $C_p=var$ быстрее торможение потока, нет отрывной зоны на входе в изолятор (сверху). Пиковые значения температуры в канале изолятора меньше. Уровень пульсаций давления в изоляторе ниже.

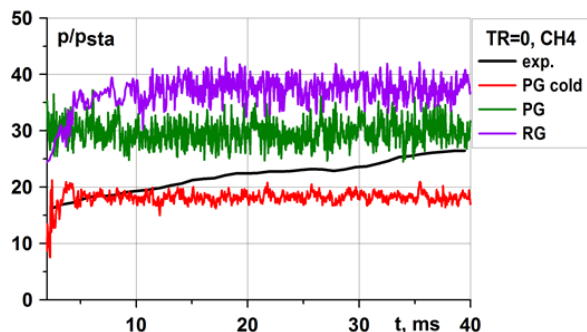
Показатель адиабаты γ



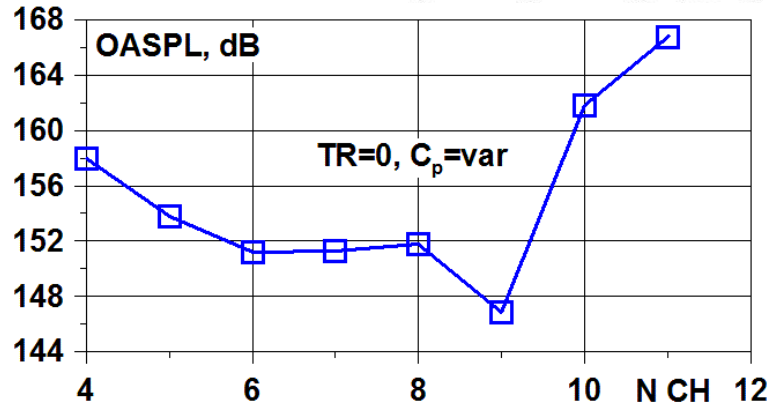
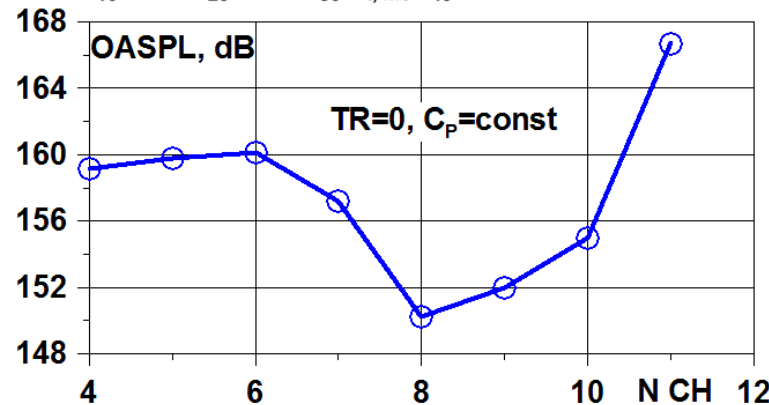
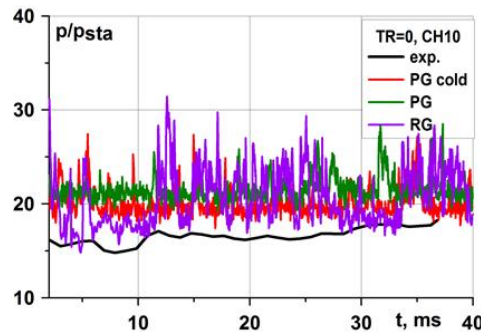
Малые значения γ наблюдаются в основном в зоне отрыва у нижней стенке около входа в изолятор и в окрестности выхода, где задано высокое статическое давление и происходит торможение потока.



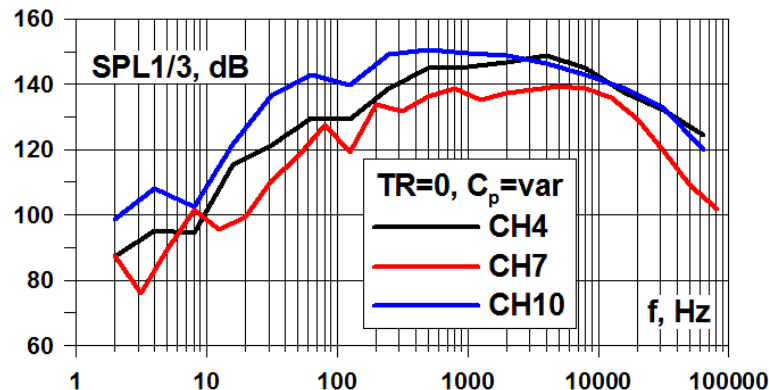
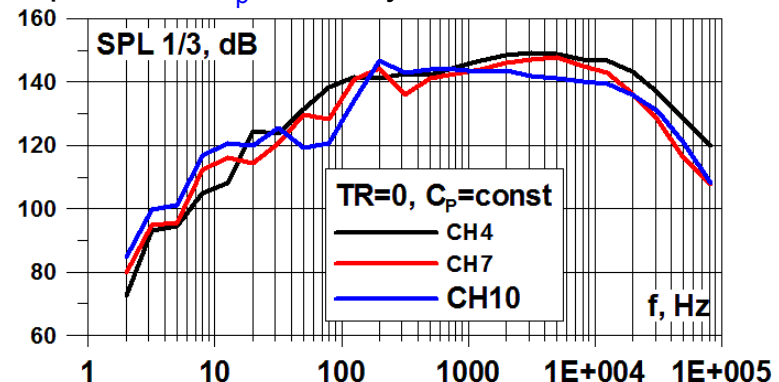
Спектры пульсаций давления в изоляторе при $TR=0$



Зависимость от времени давления на верхней стенке канала изолятора в точках расположения датчиков CH4 и CH10



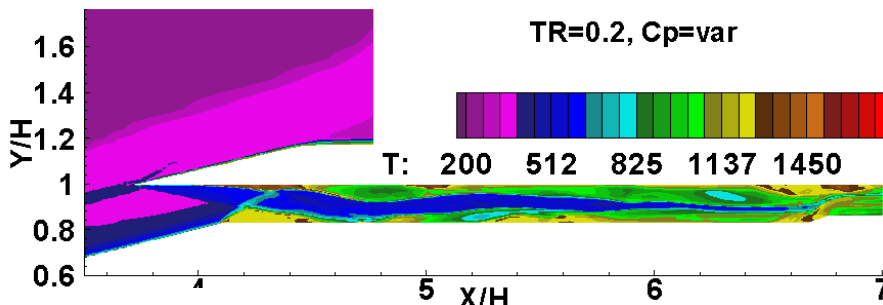
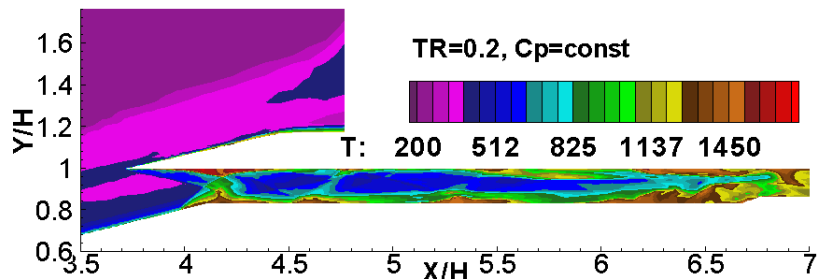
При $C_p=const$ на первой трети длины изолятора уровень OASPL почти постоянный около 160дБ, для варианта с $C_p=var$ он уменьшается по длине изолятора ВЗ до 152дБ.



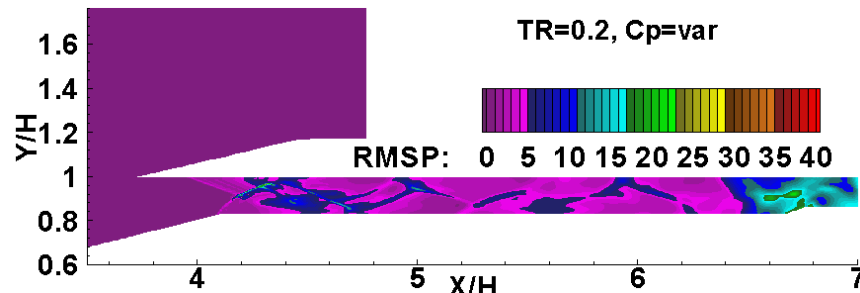
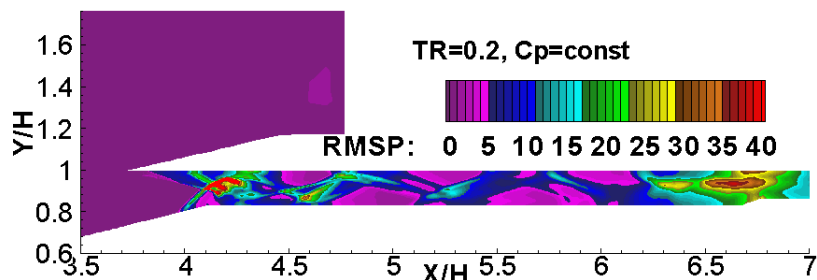
При $C_p=var$ пиковое значение в спектре пульсаций сильнее меняется по частоте по длине канала изолятора

Поля течения и турбулентности в ВЗ при $TR=0.2H$

Мгновенная статическая температура



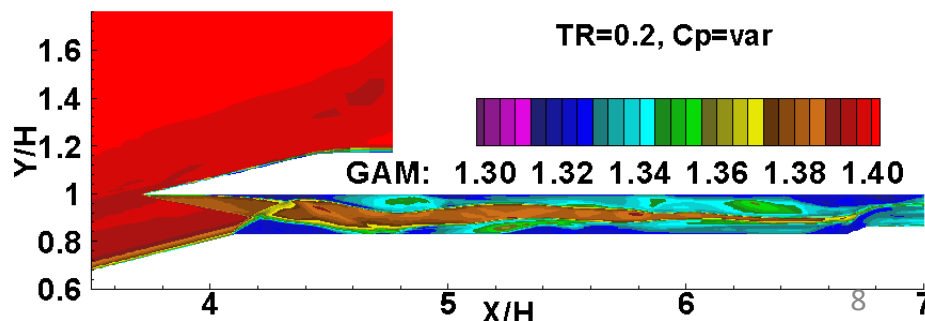
Пульсации статического давления



При $C_p=var$ в изоляторе нарастает более толстый пограничный слой. Уровень пульсаций давления ниже, чем при постоянной теплоемкости.

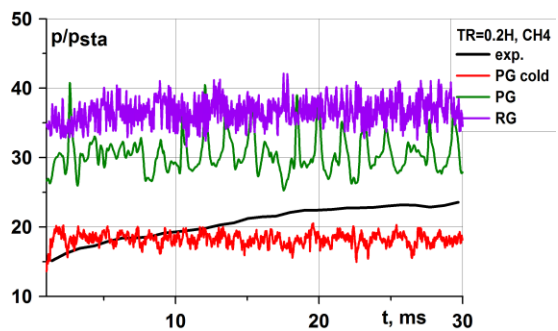
Картина течения перед входом в изолятор близка к той, которая была при $TR=0$. Однако в изоляторе торможение потока при $C_p=var$ происходит менее интенсивно. Это видно в точке CH10 (на следующем слайде).

Показатель адиабаты γ



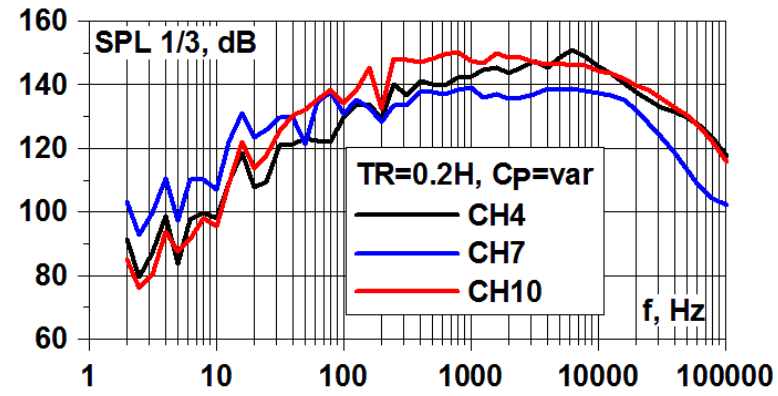
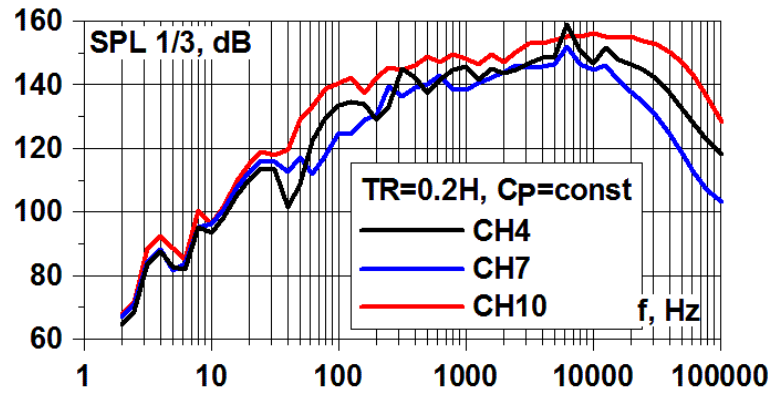
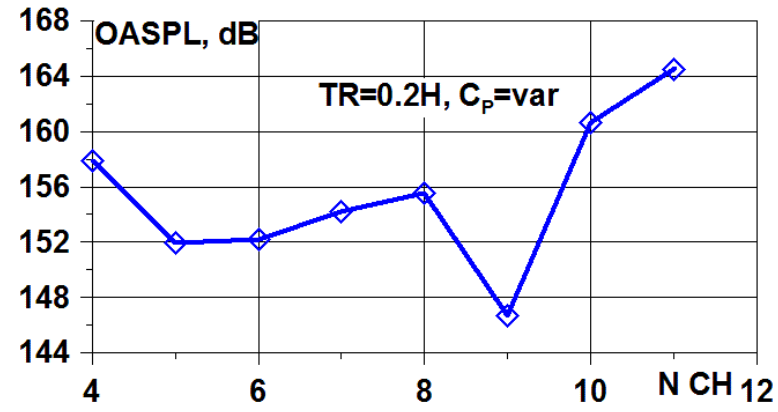
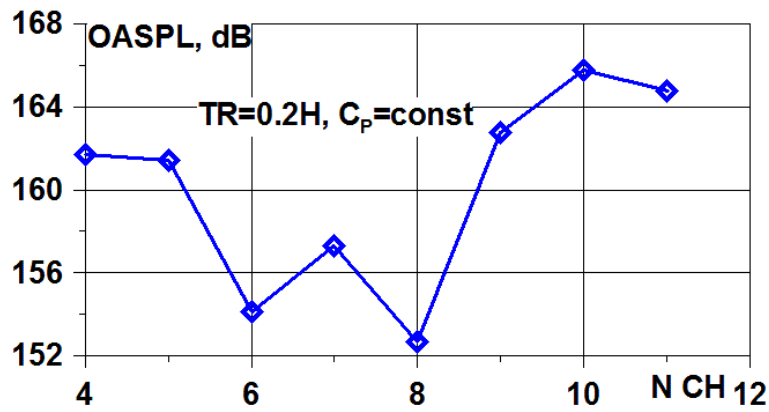
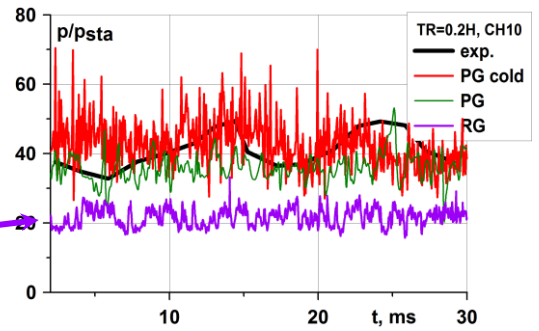


Спектры пульсаций давления в изоляторе при $TR=0.2H$



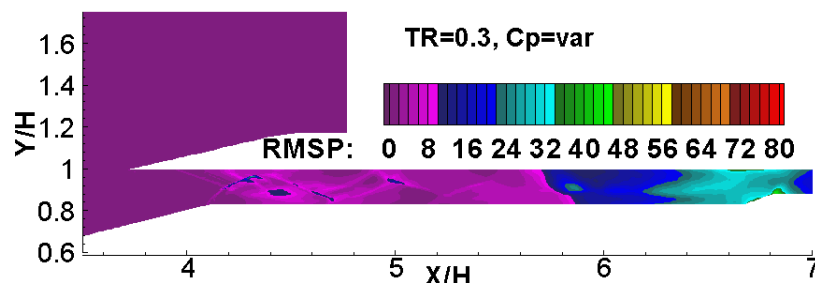
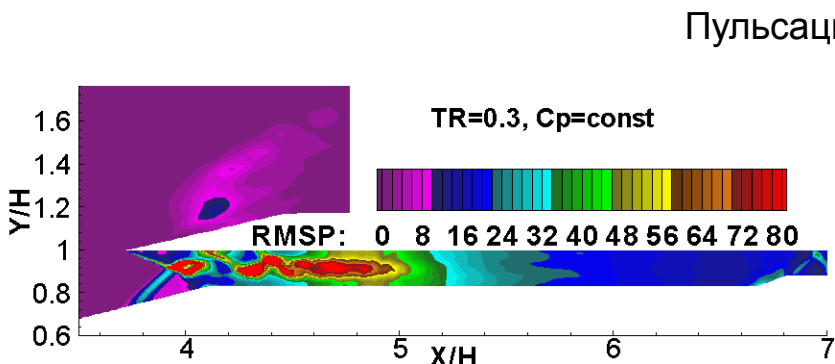
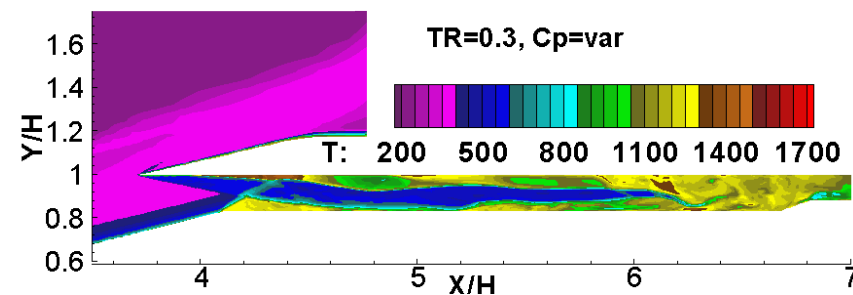
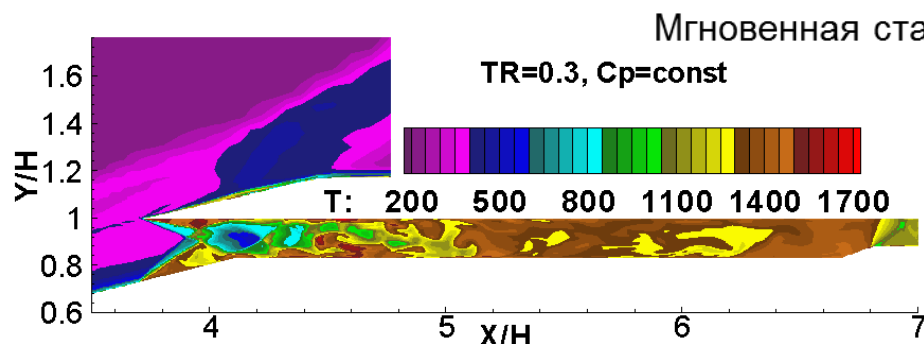
Зависимость от времени давления на верхней стенке канала изолятора в точках расположения датчиков **CH4** и **CH10**

Торможение потока при $C_p=var$ происходит менее интенсивно

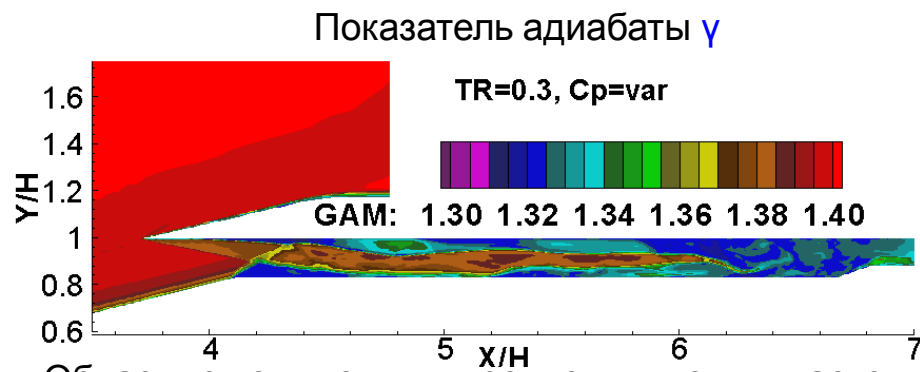


При $C_p=const$ и $C_p=var$ пиковые значения пульсаций давления наблюдаются при разных частотах. Для $C_p=var$ спектр более пологий.

Поля течения и турбулентности в ВЗ при $TR=0.3H$



При расчете с $C_p=const$ и в эксперименте торможение потока происходило в коротком псевдоскачке, и в большей части изолятора оно было дозвуковым. При этом температура потока практически не влияла на характер течения. В случае переменной γ торможение потока осуществлялось в системе косых скачков уплотнения. Разный характер торможения определил различный характер распределения по длине изолятора температуры и турбулентных пульсаций, и разные их пиковые значения.



Область с пониженным уровнем γ увеличивается и находится в основном в окрестности выхода из канала изолятора, где течение низкоскоростное, а температура близка к температуре торможения.¹⁰

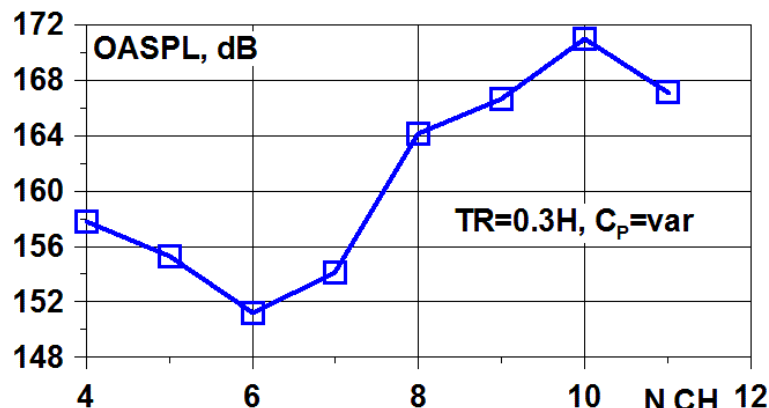
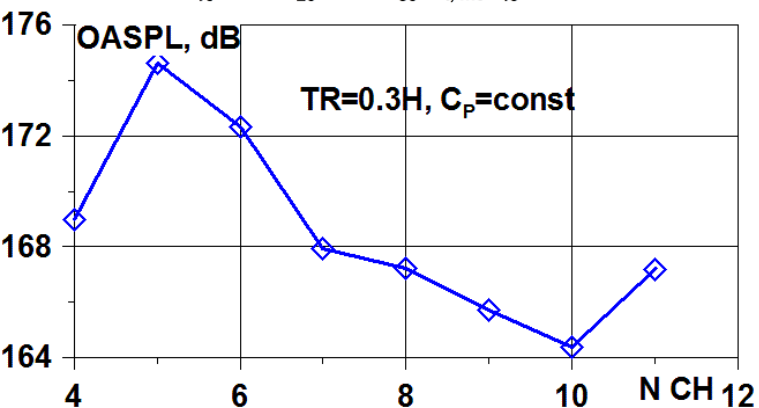
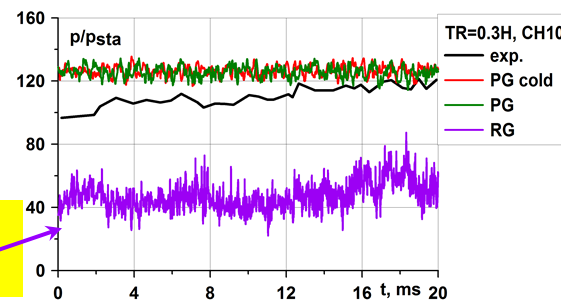


Спектры пульсаций давления в изоляторе при $TR=0.3H$

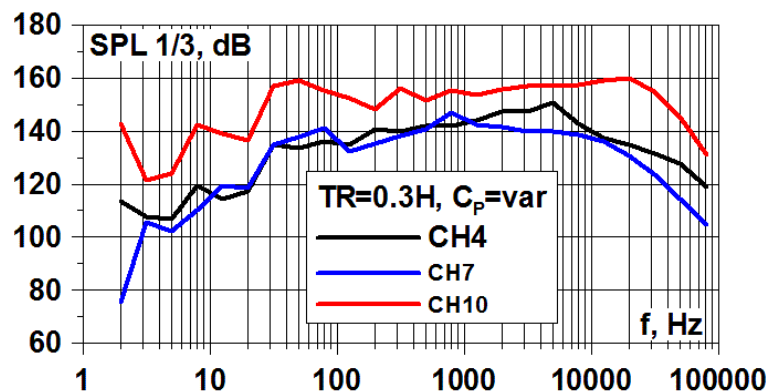
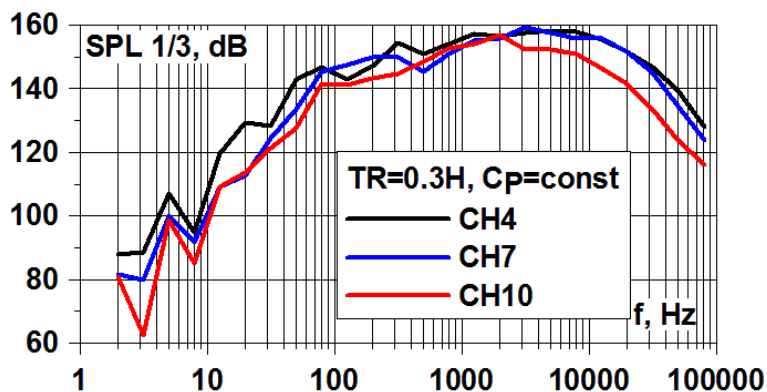


Зависимость от времени давления на верхней стенке канала изолятора в точках расположения датчиков **CH4** и **CH10**

При $C_p=var$ существенно ниже уровень давления, но больше пульсации



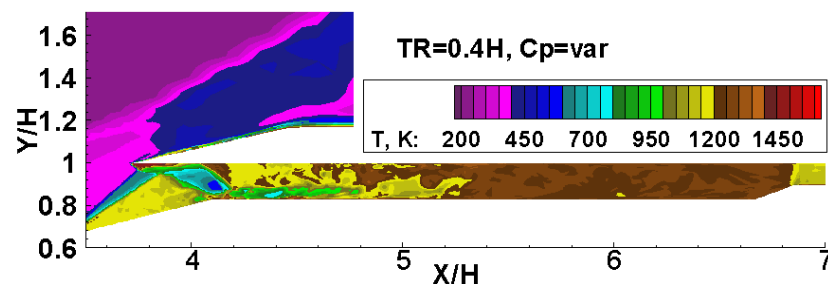
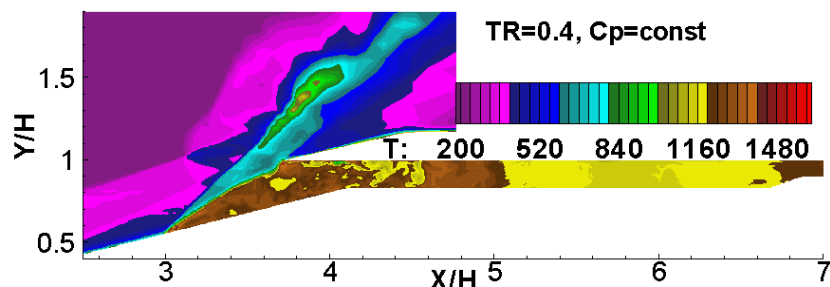
При $C_p=var$ в большей части изолятора уровень OASPL на верхней стенке значительно ниже до 20дБ



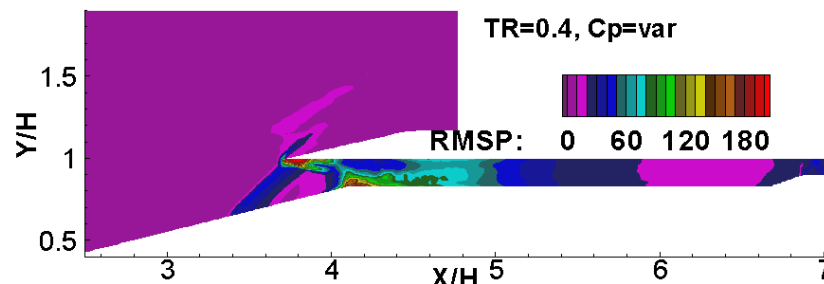
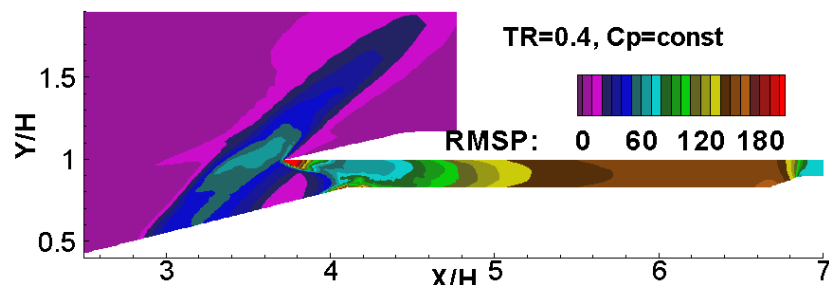
Пиковые значения пульсаций давления у датчиков, расположенных ближе к входу в изолятор, ниже до 20дБ. Это обусловлено тем, что длина системы скачков в изоляторе больше при $C_p=var$. Частота, при которой достигаются максимумы пульсаций, выше у варианта с $C_p=var$.

Поля течения и турбулентности в ВЗ при $TR=0.4H$

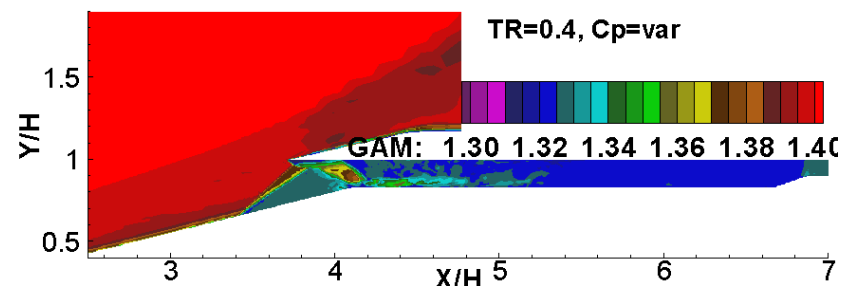
Мгновенная статическая температура



Пульсации статического давления



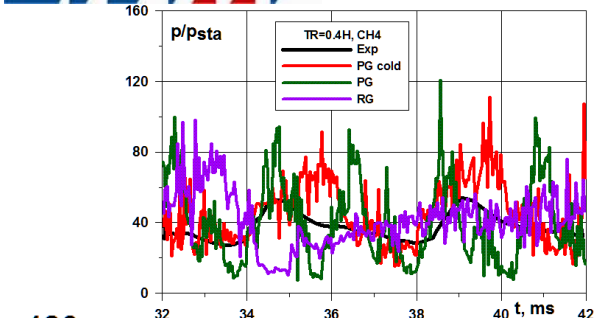
Показатель адиабаты γ



Область с низким уровнем γ занимает почти весь изолятор

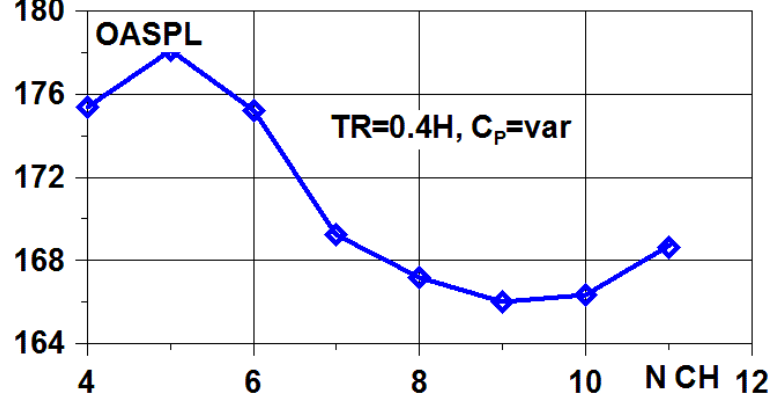
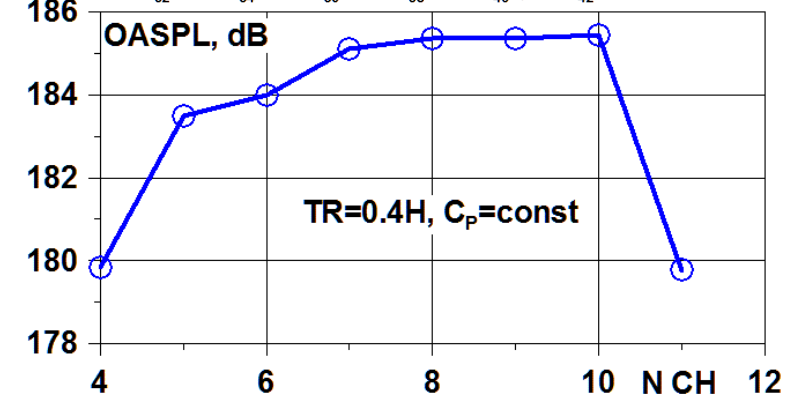
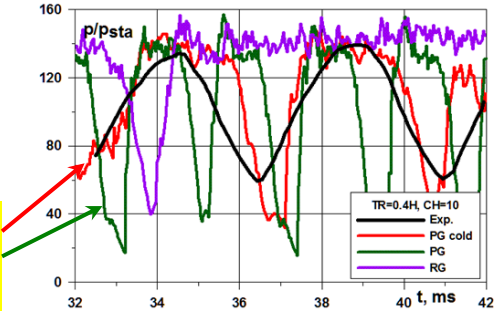
У варианта с $C_p=const$, как и в эксперименте, начинается помпаж ВЗ. В случае $C_p=var$ он не наблюдается. В этом случае ВЗ практически незапущен. Существенно разное распределение температуры по длине ВЗ для обоих вариантов. Это связано с тем, что при $C_p=var$ торможение потока осуществляется в псевдоскачке, а в случае $C_p=const$ – в нестационарной ударной волне.

ЦИАН Спектры пульсаций давления в изоляторе при TR=0.4H

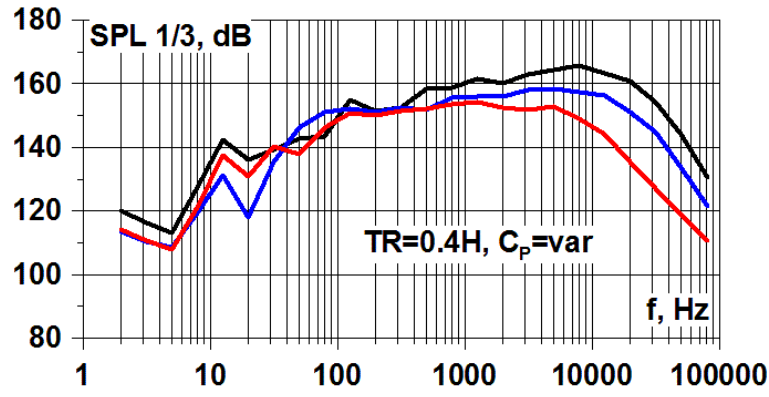
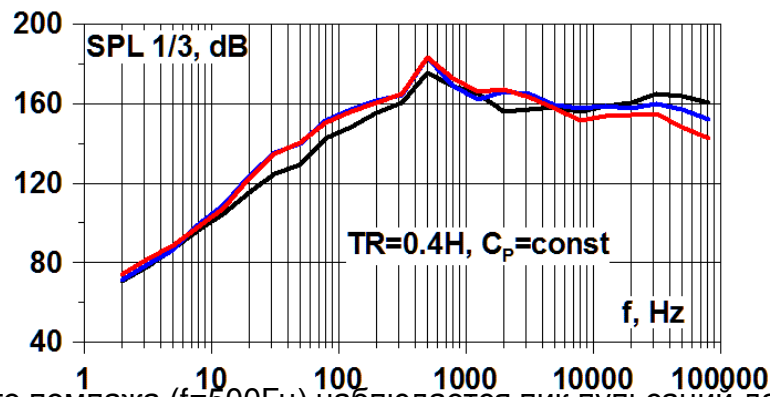


Зависимость от времени давления на верхней стенке канала изолятора в точках расположения датчиков CH4 и CH10

С ростом температуры частота помпажа растет

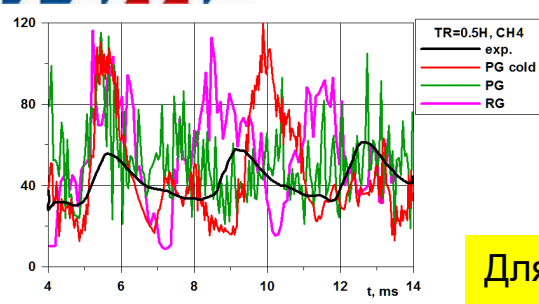


Помпажный режим характеризуется высоким уровнем пульсаций давления почти по всей длине изолятора. Его пиковое значение на 7дБ выше, чем у варианта $C_p=var$. В этом случае пик пульсаций расположен около входа в изолятор, где происходит торможение потока в псевдоскачке.

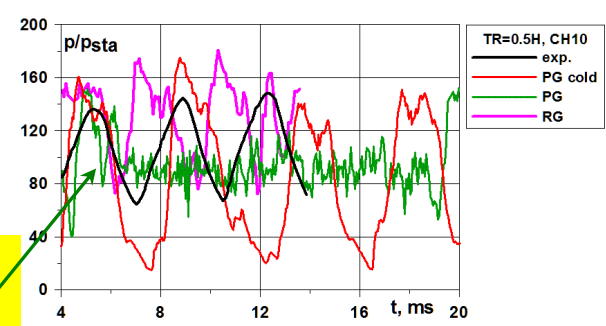


На частоте помпажа ($f=500\text{Гц}$) наблюдается пик пульсаций давления. Для $C_p=var$ 1/3 октавный спектр имеет небольшой подъем на высоких частотах, вызванный турбулентным характером течения. Похожий пик наблюдается и при $C_p=const$. Это свидетельствует, что спектральные характеристики, обусловленные турбулентными эффектами в обоих случаях близки.

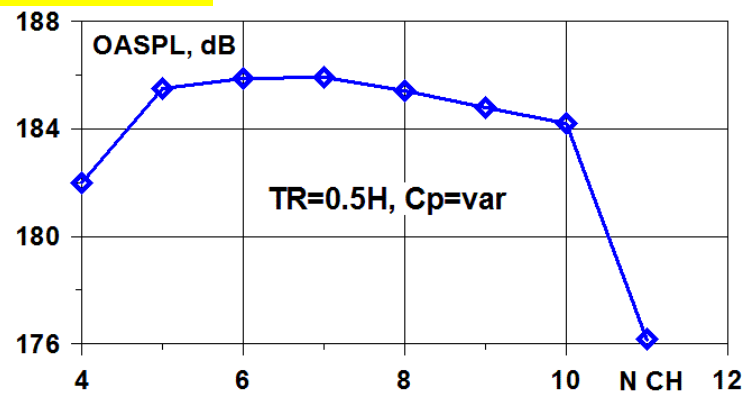
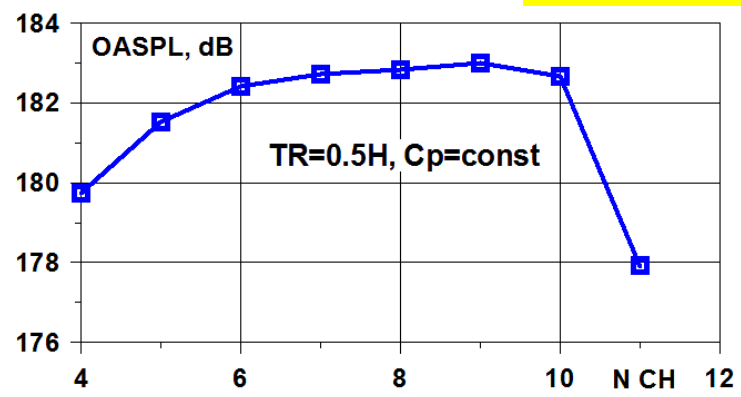
Спектры пульсаций давления в изоляторе при TR=0.5H



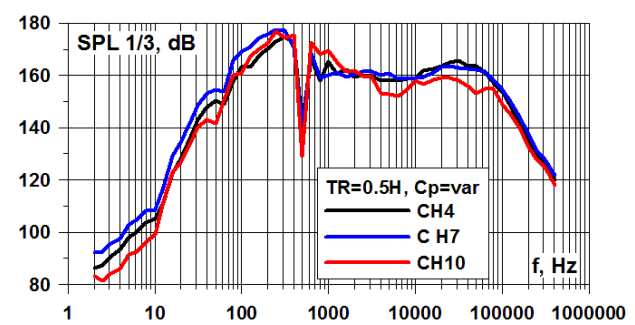
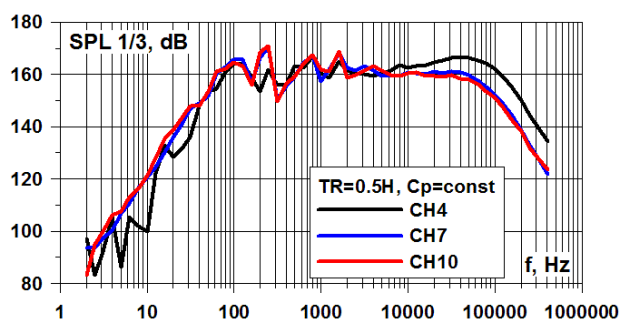
Зависимость от времени
давления на верхней стенке
канала изолятора в точках
расположения датчиков CH4 и
CH10



Для варианта с $C_p = \text{const}$ наблюдается
перемежающийся помпаж

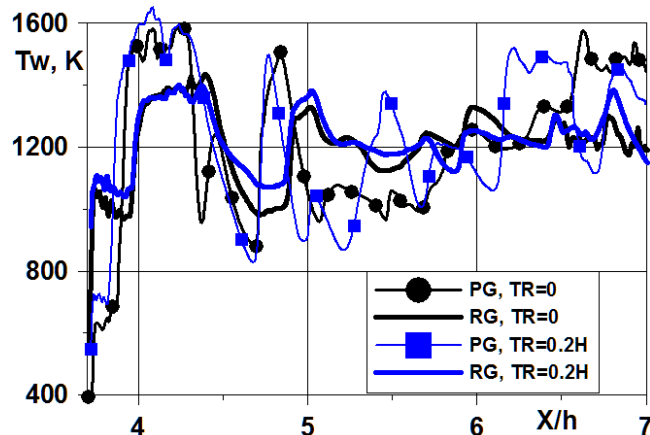


Для обоих вариантов наблюдается помпаж. У варианта $C_p = \text{var}$ пиковое значение на 4дБ выше.

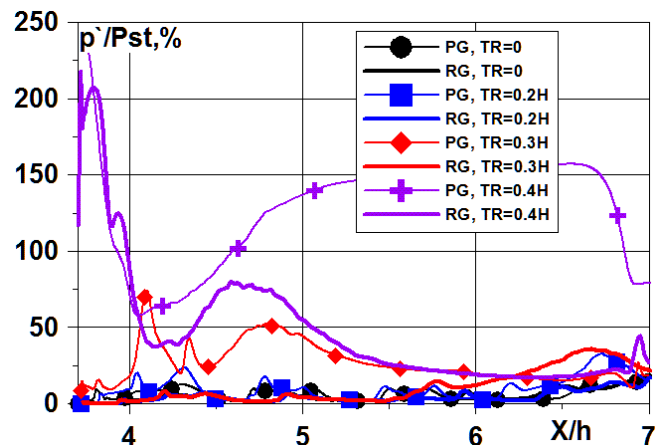


Для $C_p = \text{var}$ SPL 1/3 спектра для разных датчиков частота пика пульсаций наблюдается при разных частотах.

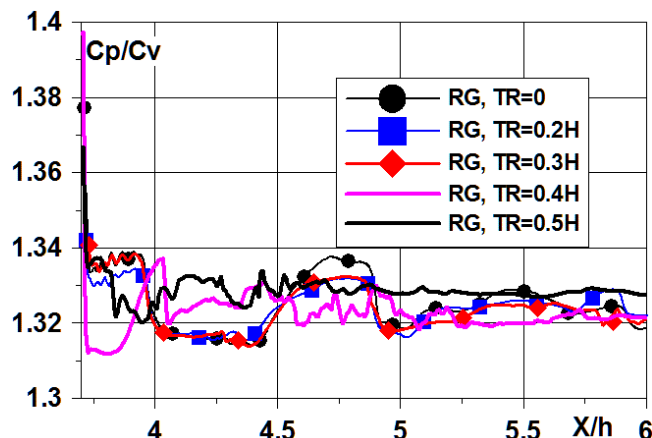
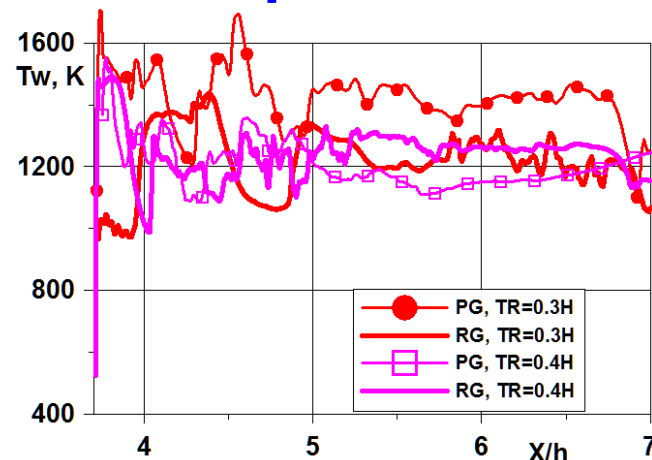
Влияние дросселирования на распределение параметров течения и турбулентности вдоль верхней стенки канала изолятора



Для варианта с $C_p = \text{var}$ пиковые значения температуры T_w не превышают **1400K**. В случае $C_p = \text{const}$ они достигают **1700K**.



Уровень пульсаций статического давления выше при $C_p = \text{const}$. С увеличением дросселирования эта разница возрастает. Пиковые значения пульсаций давления при $TR=0.3H$ достигают **70%**, а при $TR=0.4H$ - **260%** P_{st} .



Для всех исследованных режимов дросселирования уровень $\gamma = C_p/C_v$ на верхней стенке канала изолятора составлял **1.31-1.34**.

- ❑ С помощью модифицированного RANS/ILES метода проанализировано влияние дросселирования и переменной теплоемкости C_p (показатель адиабаты γ менялся в пределах **1.31-1.4**) на течение, уровень и спектральные свойства пульсаций давления в модельном высокоскоростном ВЗ.
- ❑ Установлено, что при коэффициенте дросселирования $TR=0$ при $C_p=const$ на первой трети длины изолятора уровень OASPL почти постоянный около 160дБ, для варианта с $C_p=var$ он уменьшается по длине изолятора ВЗ до 152дБ, а пиковое значение в спектре пульсаций сильнее меняется по длине канала изолятора. При $TR=0.2H$ течение перед входом в изолятор близко к тому, которое было при $TR=0$. Однако в изоляторе торможение потока при $C_p=var$ происходит менее интенсивно, уровень пульсаций давления ниже, чем при постоянной теплоемкости.
- ❑ Для $TR=0.3H$ при расчете с $C_p=const$ и в эксперименте торможение потока происходило в коротком псевдоскачке, и в большей части изолятора оно было дозвуковым. В случае $C_p=var$ поток тормозился в системе косых скачков уплотнения. Разный характер торможения определил разный характер распределения по длине изолятора температуры и турбулентных пульсаций, и их различные пиковые значения. При $C_p=var$ в большей части изолятора уровень OASPL на верхней стенке значительно ниже до 20дБ. Пиковые значения пульсаций давления у датчиков, расположенных ближе к входу в изолятор, ниже до 20дБ. Это обусловлено тем, что длина системы скачков в изоляторе больше при $C_p=var$. Частота, при которой достигаются максимумы пульсаций, выше у варианта с $C_p=var$.
- ❑ При $TR=0.4H$ в эксперименте и в расчете с $C_p=const$ начинался помпаж, температура слабо влияла на характер колебаний. При $C_p=var$ наблюдался незапуск ВЗ. При этом частота помпажа растет с ростом температуры набегающего потока. Помпажный режим характеризуется высоким уровнем пульсаций давления почти по всей длине изолятора. Его пиковое значение на 7дБ выше, чем у варианта $C_p=var$. В этом случае пик пульсаций расположен около входа в изолятор, где происходит торможение потока в псевдоскачке.

Спасибо за внимание!