

Анализ влияния неоднородного набегающего потока на спектральные свойства и уровень пульсаций давления в сверхзвуковом воздухозаборнике с помощью RANS/ILES-метода

Р.Ш. Аюпов, Л.А. Бендерский, Д.А. Любимов
(ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова»)

*Седьмая всероссийская конференция «Вычислительный эксперимент в аэроакустике»
г. Светлогорск 17-22 сентября 2018 г.*

Неоднородность поля температуры в набегающем потоке может возникать при попадании в воздухозаборник (ВЗ) горячего следа двигателя другого летательного аппарата. Для правильного определения безопасности эксплуатации летательного аппарата требуется знать поведение узлов его силовой установки, в том числе в условиях неоднородного набегающего потока перед ВЗ. Вихреразрешающие методы позволяют получать необходимые характеристики течения, такие как пульсации скорости, давления, температуры, шум в ближнем и дальнем поле, спектры пульсаций давления.

Целью данной работы являлось исследование с помощью RANS/ILES метода влияния размеров области с повышенной температурой в потоке и степени ее повышения на спектральные характеристики шума сверхзвукового ВЗ и акустическое воздействие на стенки ВЗ.

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:

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

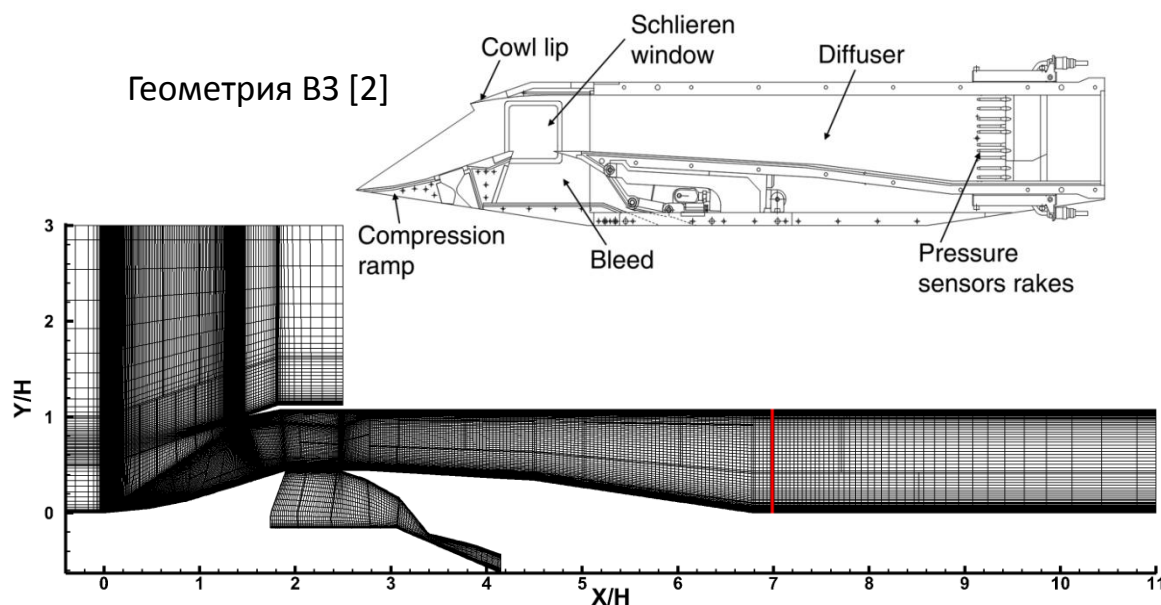
В выражении для f_d функции f_b , f_e и ψ такие же, как и в методе IDDES. В формуле (3) функция f_{dt} определена следующим образом:

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

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:

Постановка задачи

Геометрия ВЗ [2]

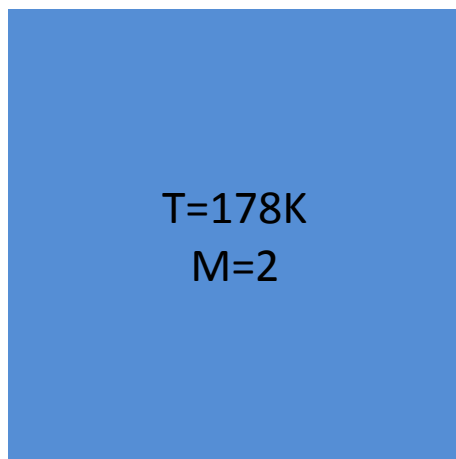


Сечение расчетной сетки, 4.5млн ячеек. Красной линией обозначено выходное сечение, где брались параметры потока для характеристик ВЗ.

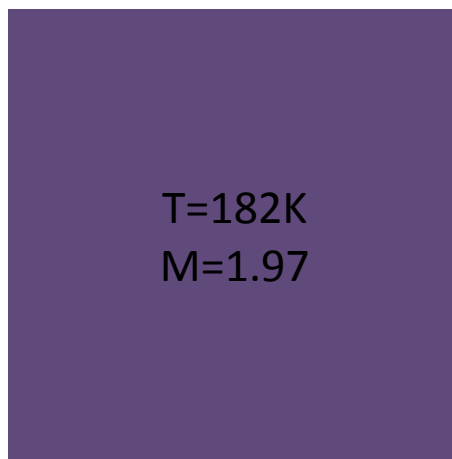
Полное давление потока, P_0	2.4×10^5 Па
Полная температура потока, T_0	320 К
Число Маха потока, M	2
Скорость потока, U	535 м/с
Статическая температура потока, T	178 К
Число Рейнольдса по высоте входа, Re	2.7×10^6

- На внешних сверхзвуковых границах фиксировались все параметры.
- На наружной выходной границе — граничное условие экстраполяции.
- На выходе из системы слива пограничного слоя устанавливались статические параметры набегающего потока.
- На выходе из дозвукового диффузора для сверхкритических режимов задавалось статическое давление, изменение режима осуществлялось изменением противодавления.
- На докритических помпажных режимах дросселирование осуществлялось сужением сечения канала перед выходном.
- Неоднородность потока создавалась изменением температуры на части входной границы расчетной области перед ВЗ.

Конфигурация неоднородности потока на входе в ВЗ



Однородный поток
M=2



Однородный поток
M=1.97

Исследовалось 5 вариантов набегающего потока:

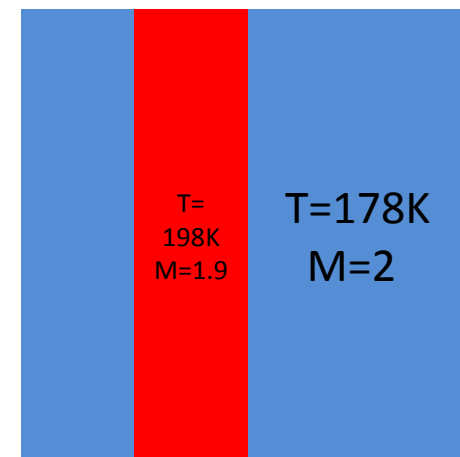
- 1) Однородный поток с **M=2** (расчетный режим)
- 2) Повышение температуры на **$\Delta T=5K$** во всем потоке, что соответствует **M=1.97**
- 3) Статическая температура повышена на **$\Delta T=10K$** на половине площади входа в ВЗ
- 4) Статическая температура повышена на **$\Delta T=15K$** на половине площади входа в ВЗ
- 5) Статическая температура повышена на **$\Delta T=20K$** на четверти ВЗ



Половина подогрета
на **$\Delta T=10K$**
M_{ср}=1.97

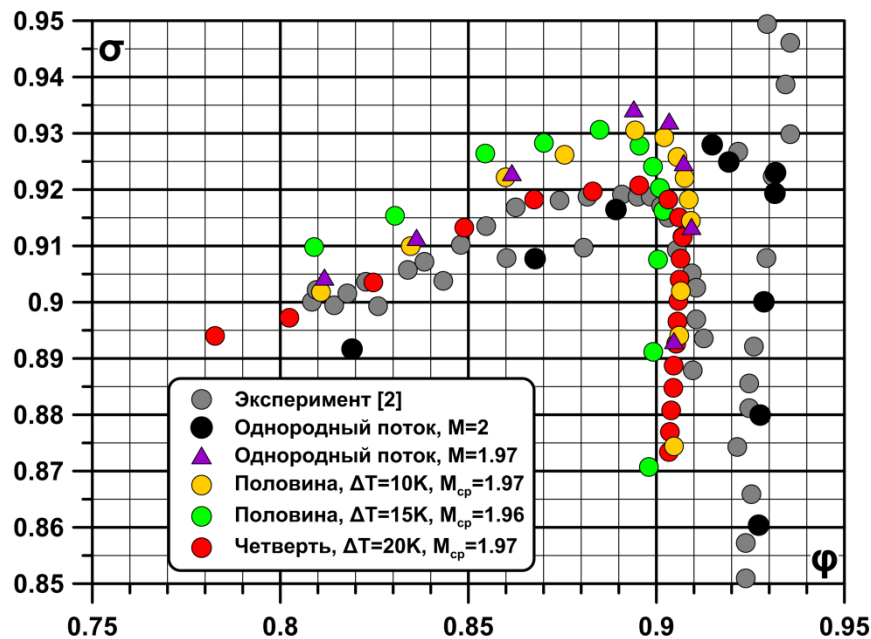


Половина подогрета
на **$\Delta T=15K$**
M_{ср}=1.96

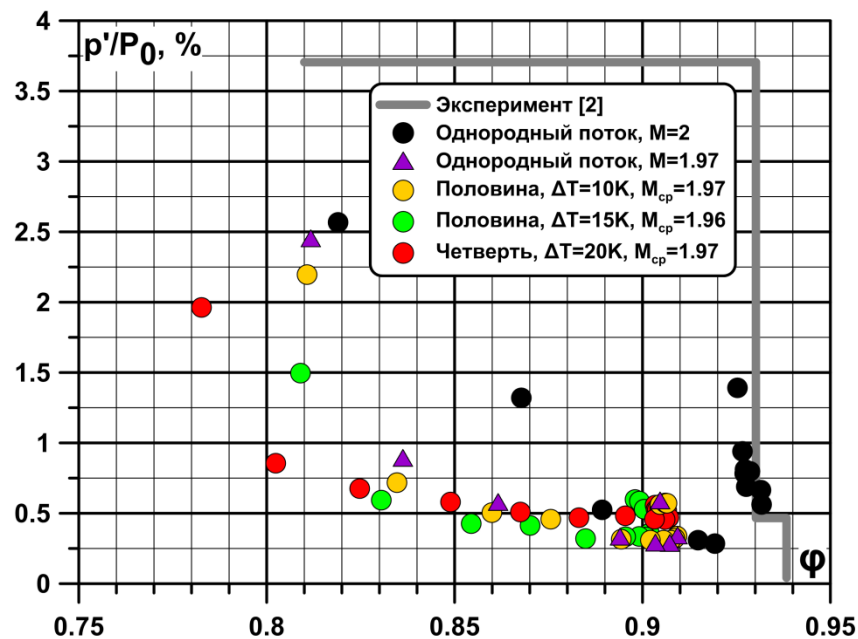


Четверть подогрета на
 $\Delta T=20K$
M_{ср}=1.97

Характеристики воздухозаборника



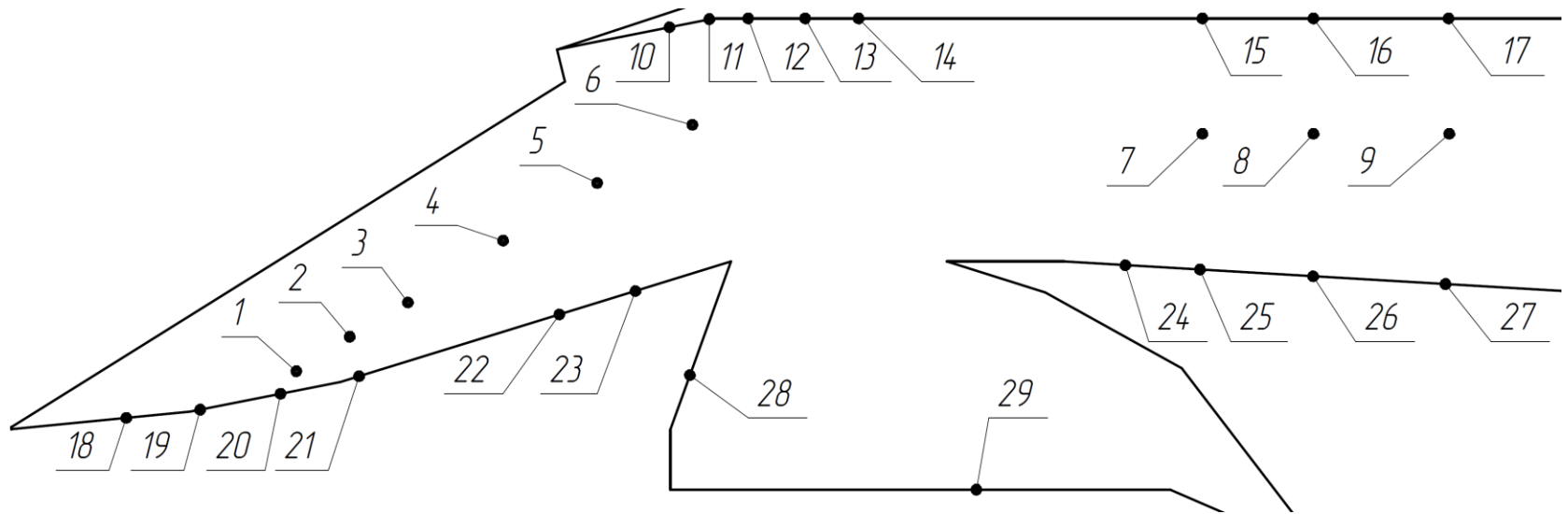
Дроссельная характеристика ВЗ



Пульсации статического давления на выходе

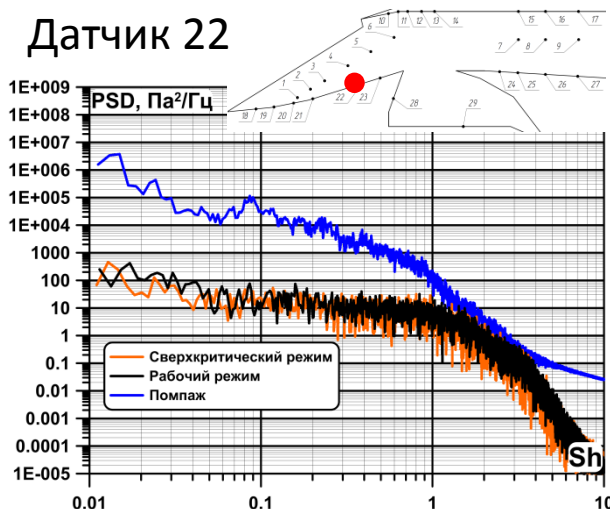
- Удовлетворительное совпадение расчета и эксперимента в условиях однородного потока с $M=2$ на сетке 4.5×10^6 ячеек.
- На сверхкритических режимах ϕ остается одинаковым для всех трех вариантов со средним числом Маха $M_{cp}=1.97$.
- В «угловой точке» снижается σ : на **0.5%** для **$\Delta T=10K$** и на **1.6%** для **$\Delta T=20K$** по сравнению с однородным потоком **$M=1.97$** .
- При помпаже на дроссельной характеристике отличия незначительны, но при одинаковой степени дросселирования с неоднородностью в потоке существенно, до **3 раз**, снижается интенсивность **пульсаций статического давления** в выходном сечении.

Расположение датчиков

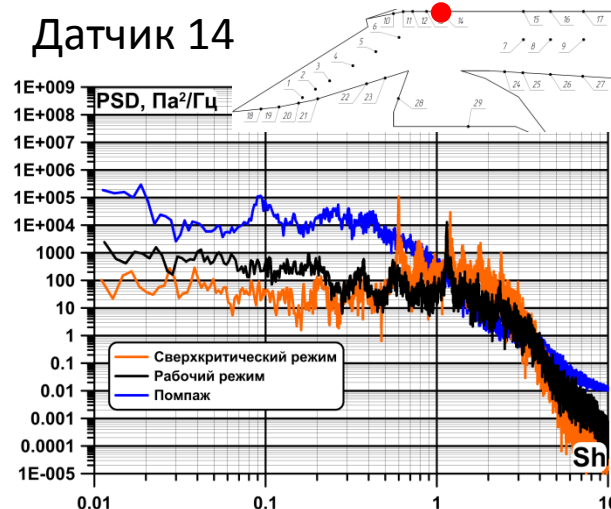


- В расчете на стенках были расположены 29 датчиков, аналогично тому, как они были расположены в эксперименте [2]. Датчики на боковой стенке располагались на стороне с повышенной температурой. Датчики на нижней и верхней стенке находились в плоскости симметрии ВЗ.
- На каждом шаге по времени в датчиках сохранялись значения параметров течения: давление, температура, плотность, составляющие вектора скорости.
- При различных конфигурациях набегающего потока проведено сравнение общеинтегрального уровня шума в датчиках для сходных дроссельных режимов: сверхкритический режим работы, «угловая точка» дроссельной характеристики и «помпаж».
- Представлены сравнения для датчиков 22, 14, 7.

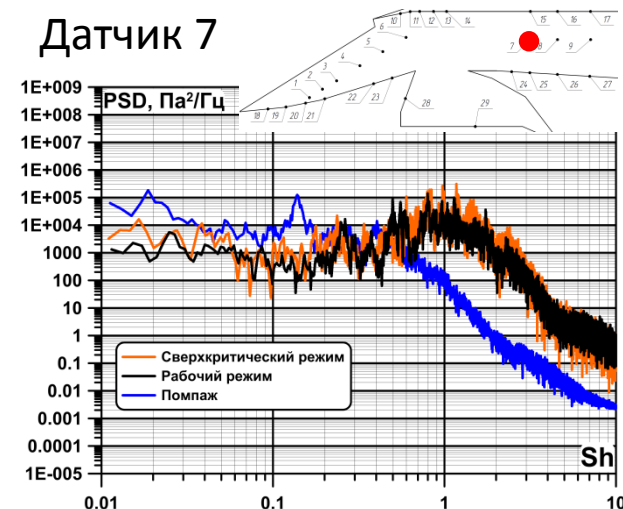
Датчик 22



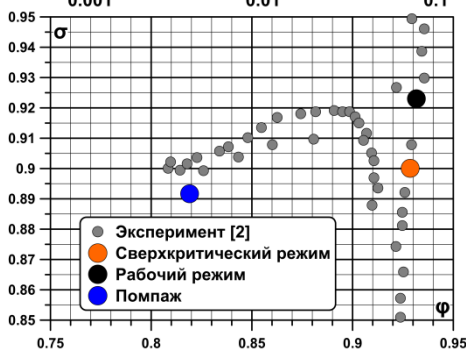
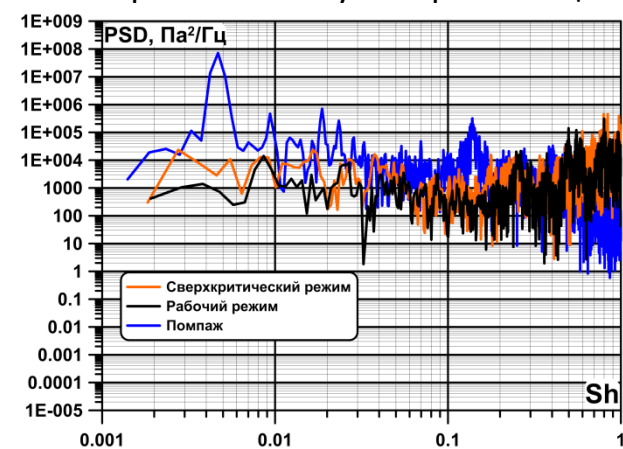
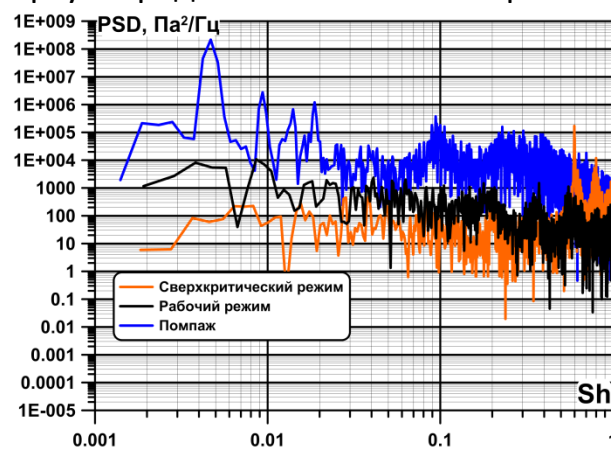
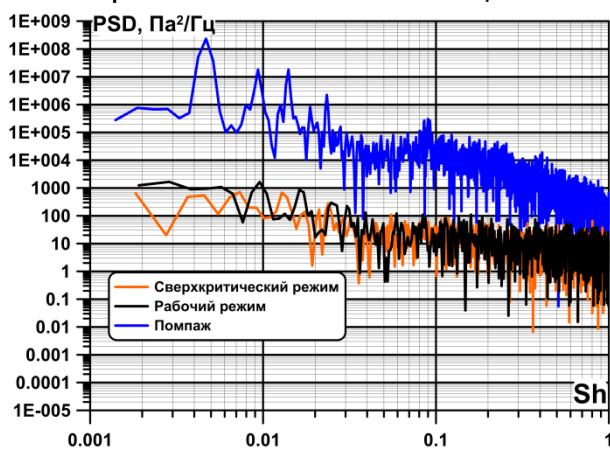
Датчик 14



Датчик 7

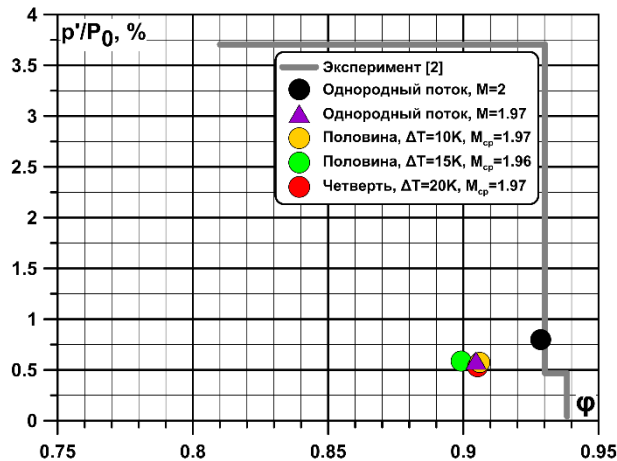
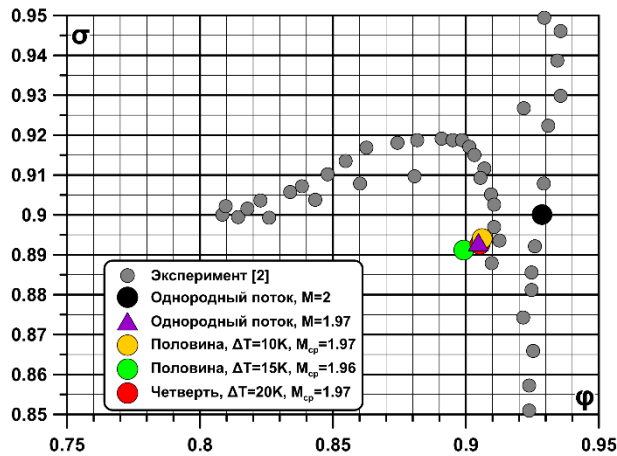


Спектральная плотность мощности. Сверху: осреднение небольших временных интервалов. Снизу: вся реализация.

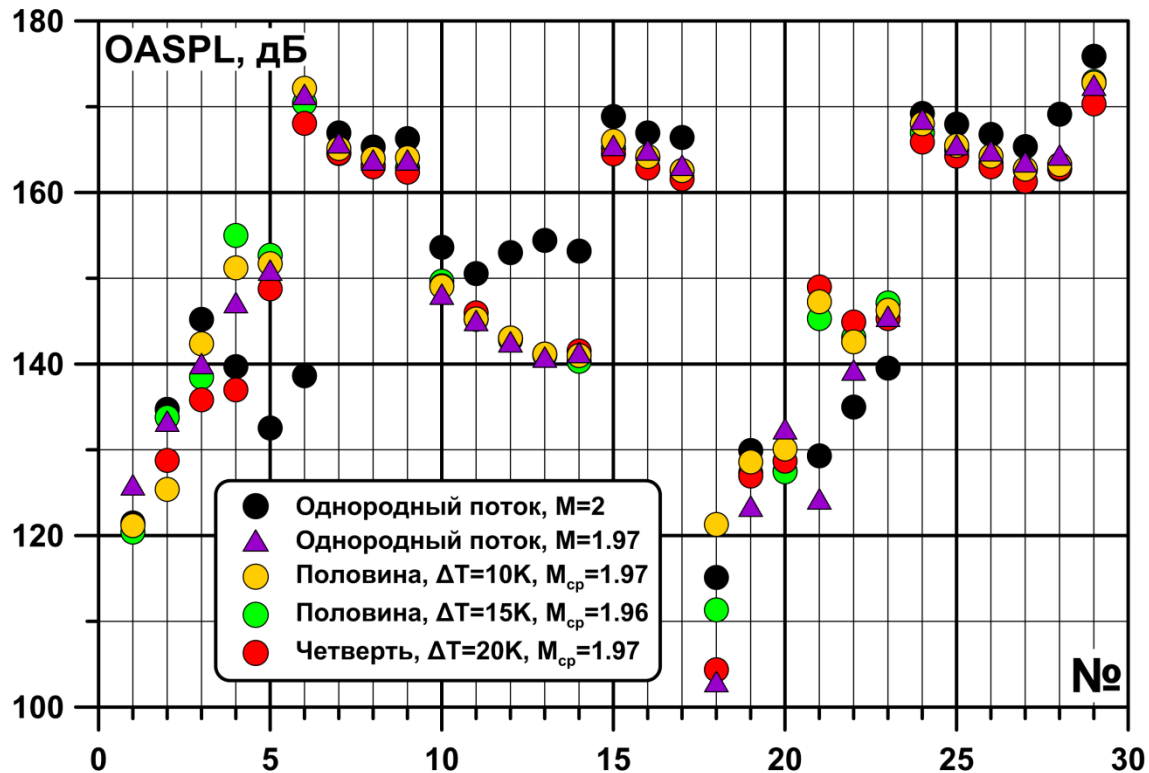
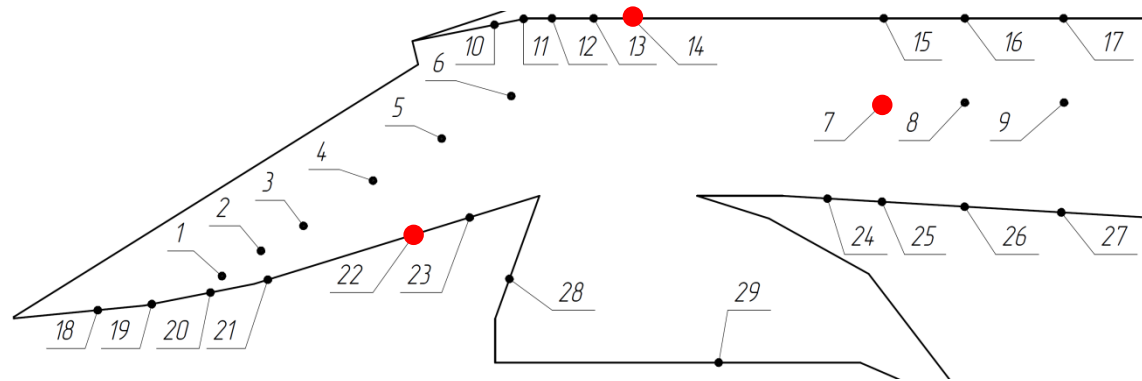


Сравнение при расчетном однородном набегающем потоке. В спектре датчика 22 влияние дросселирования проявляется лишь на помпажных режимах, когда прямой скачок начинается колебаться на поверхности торможения. Над полостью слива пограничного слоя на сверхкритических режимах на $Sh=0.6-3$ (3210–16035 Гц) интенсивность пульсаций выше, чем в угловой точке, но на более низких частотах ситуация обратная. При помпаже система слива перестает быть источником шума на частотах $Sh=0.5-4$ (2670–21380 Гц), видны частоты кратные частоте помпажа (25 Гц).

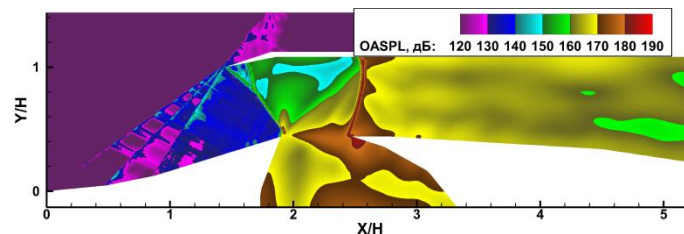
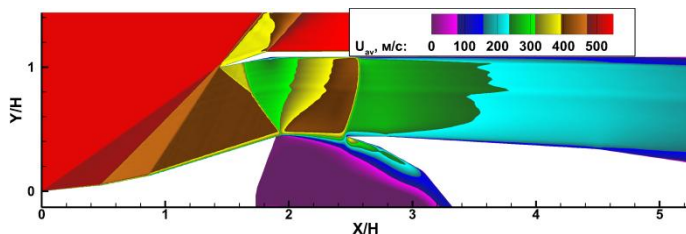
Сверхкритический режим



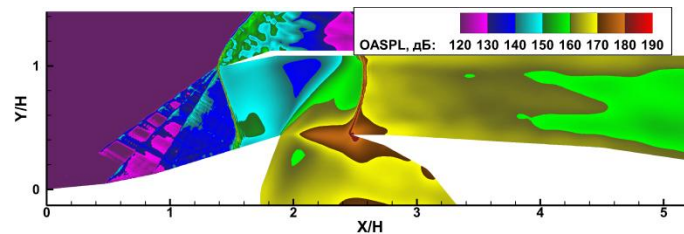
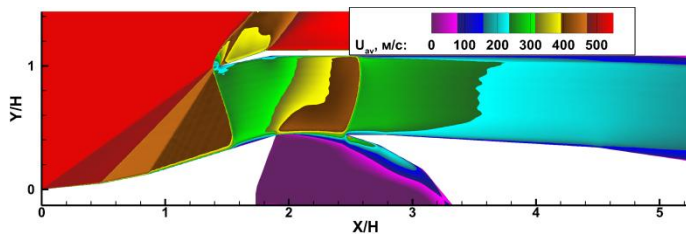
Наибольшее различие в уровне звукового давления на стенках наблюдается в горле и над полостью слива. Это вызвано иной структурой скачков в нерасчетных внешних условиях.



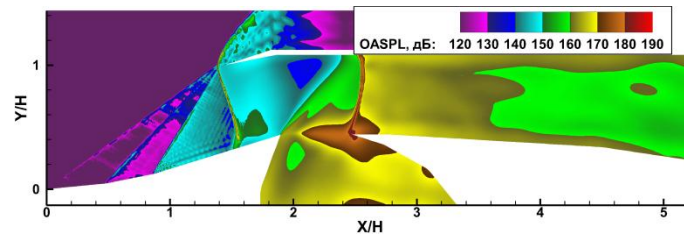
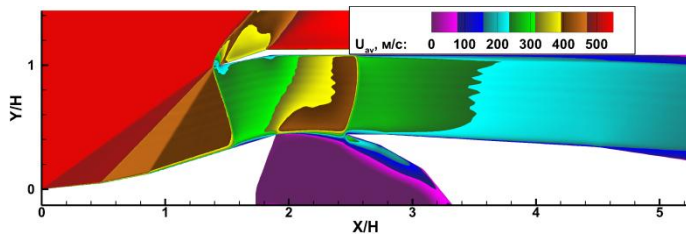
M=2



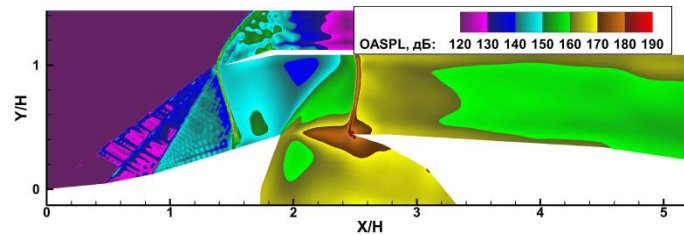
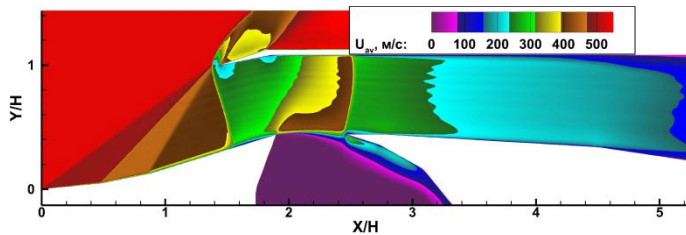
ΔT=5K



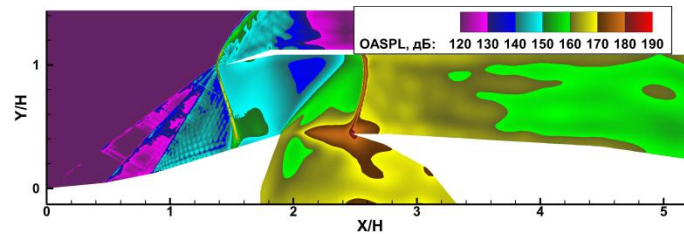
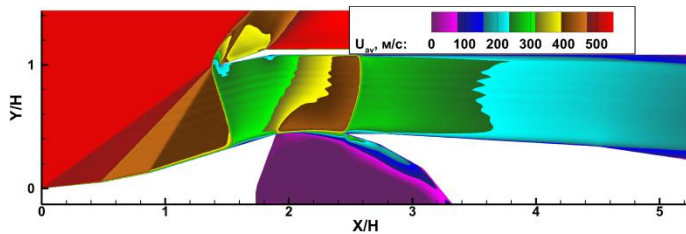
ΔT=10K



ΔT=20K

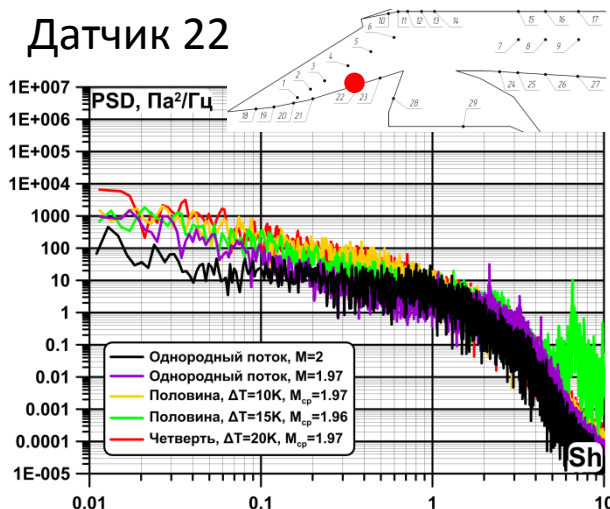


ΔT=15K

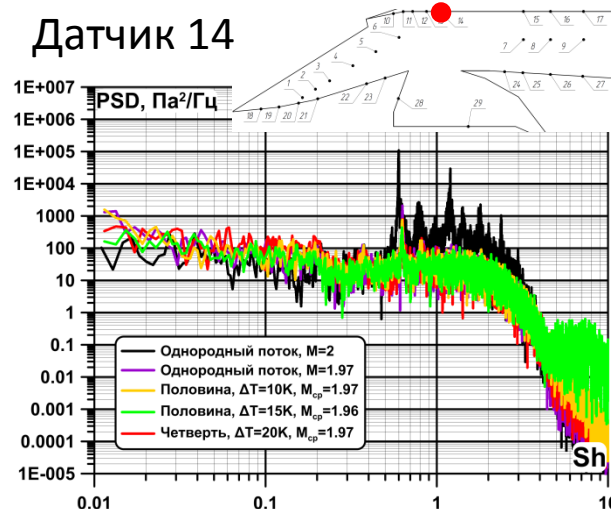


Основным источником пульсаций давления являются скачки уплотнения на входе в ВЗ и над полостью слива пограничного слоя, взаимодействующие с течением в ней.

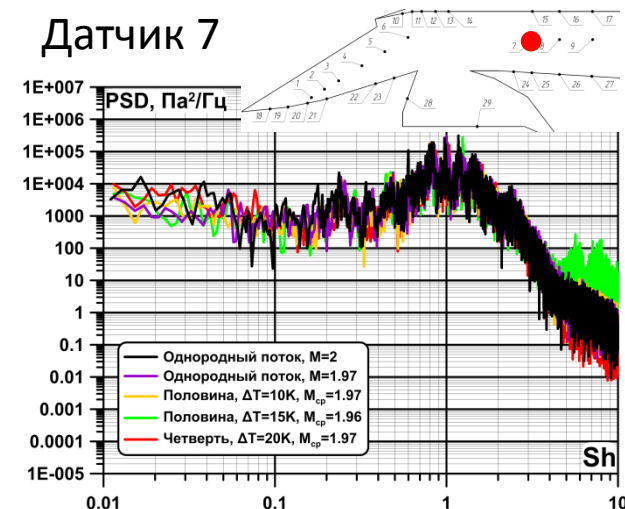
Датчик 22



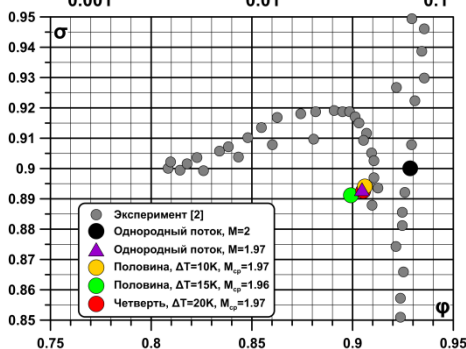
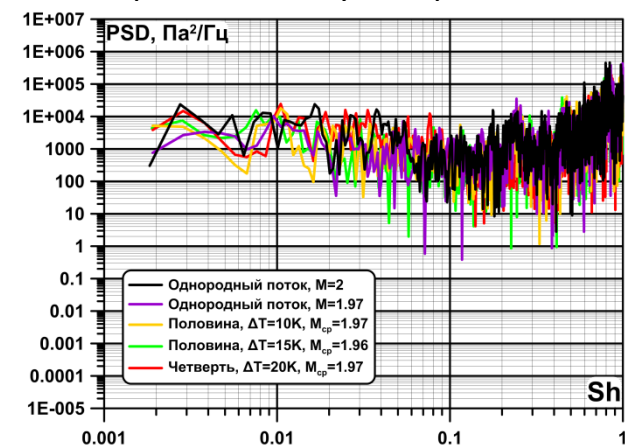
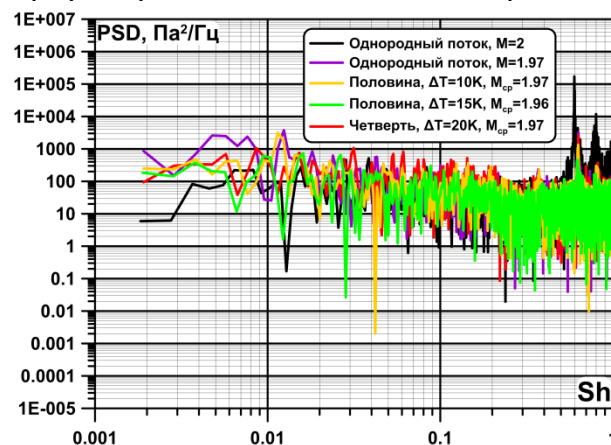
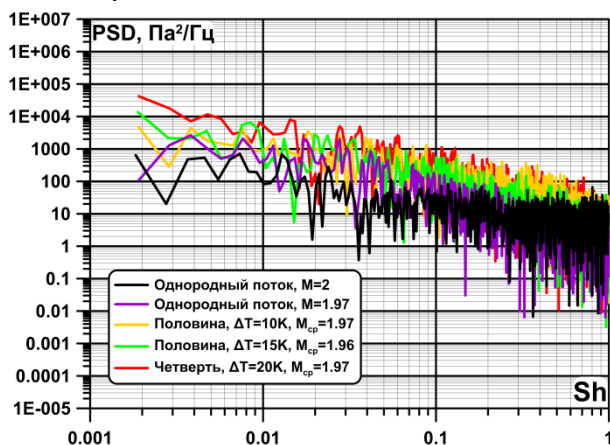
Датчик 14



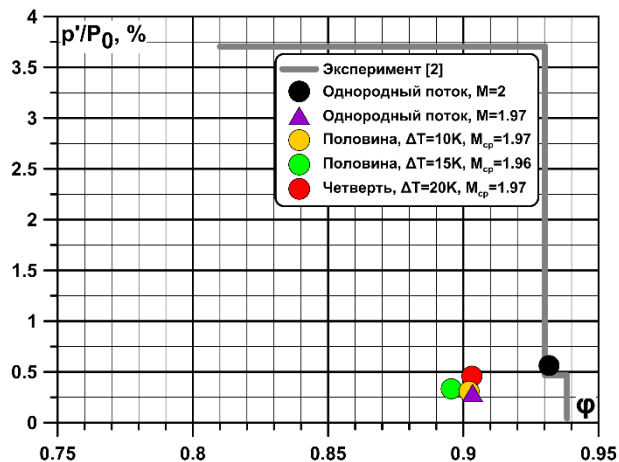
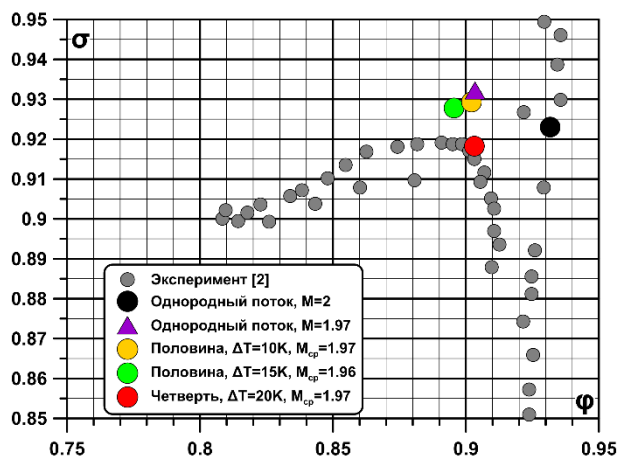
Датчик 7



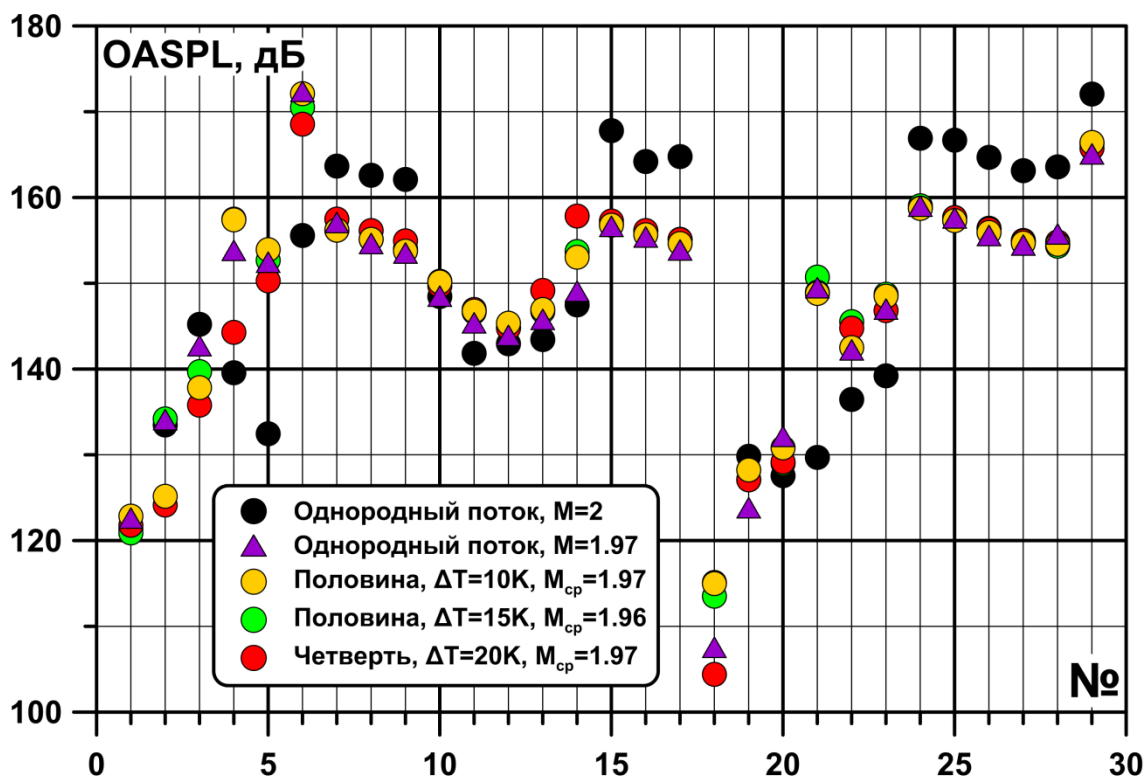
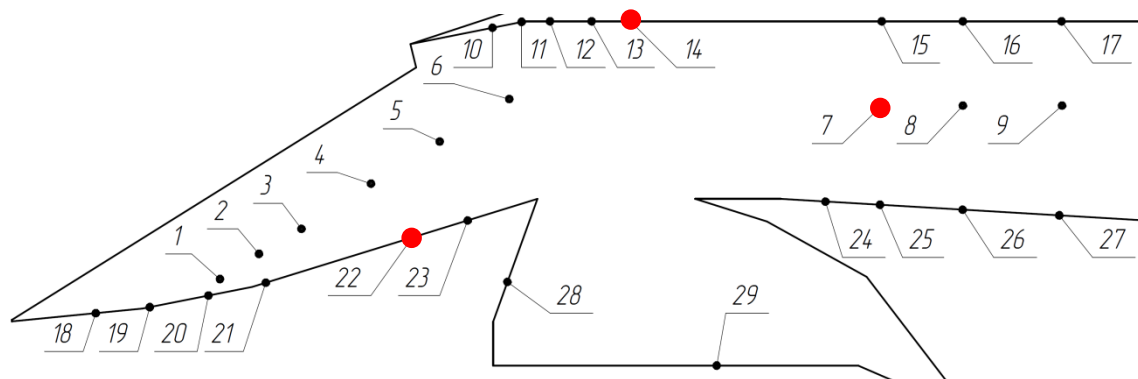
Спектральная плотность мощности. Сверху: осреднение небольших временных интервалов. Снизу: вся реализация.



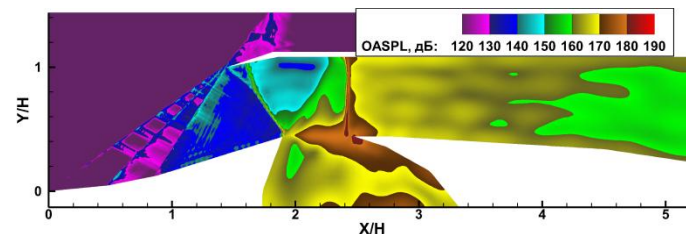
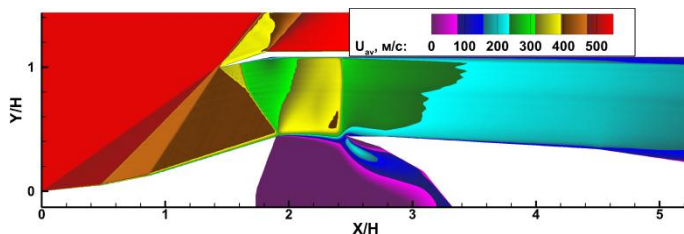
В спектрах датчика 14 на числах Струхала $Sh=0.6$ (3205 Гц) и $Sh=0.8$ (4275 Гц) во всех вариантах на фоне общего подъема выделяются локальные максимумы спектра. Менее интенсивные пики на этих же частотах видны в спектрах датчика 7. Кроме того, в спектре датчика 14 при расчетном набегающем потоке с $M=2$ имеются дискретные частоты с $Sh=1.2, 1.4, 1.8, 2.4$ (6415–12830 Гц). Их наличие объясняется взаимодействием системы скачков со слоем смешения над полостью слива пограничного слоя. В спектре датчика 7 во всех режимах наблюдается подъем на $Sh=1$.



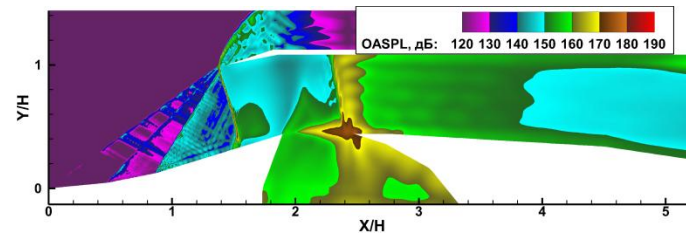
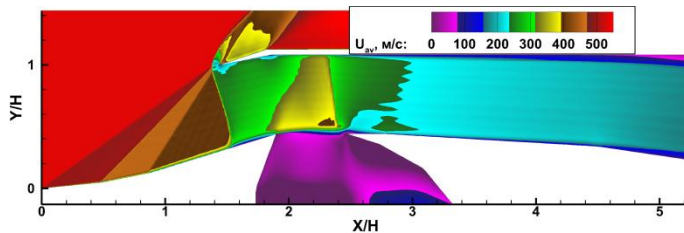
Над полостью слива пульсации с нерасчетными течениями на входе стали больше, чем с расчетным. При этом разница в уровне пульсаций в дозвуковом диффузоре выросла.



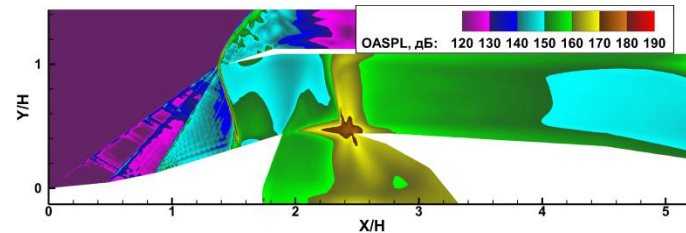
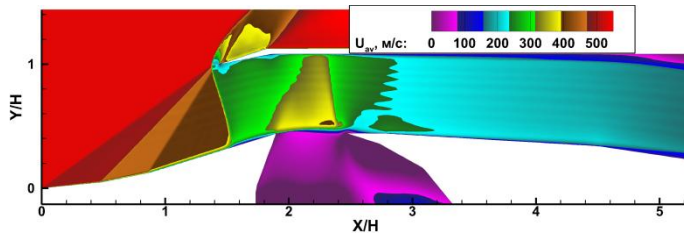
M=2



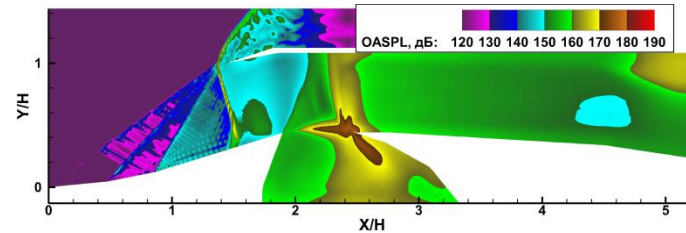
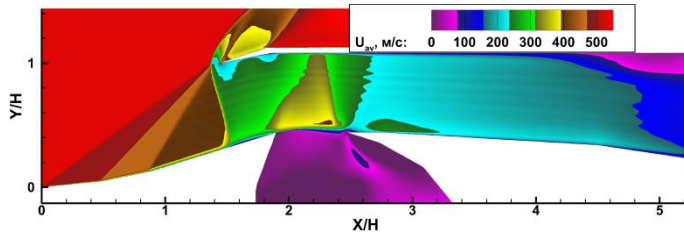
ΔT=5K



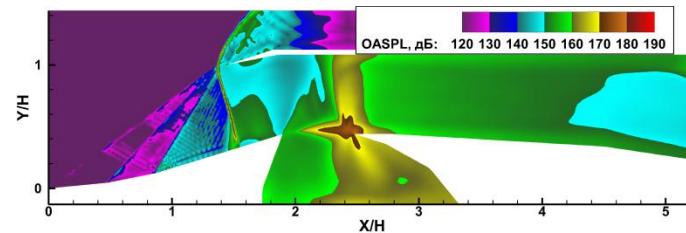
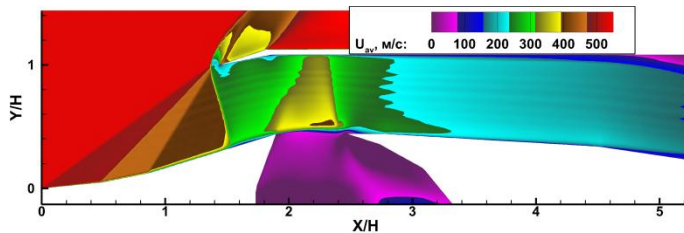
ΔT=10K



ΔT=20K

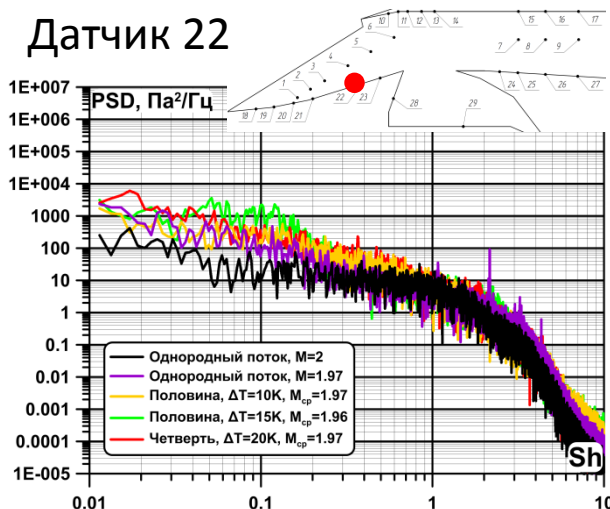


ΔT=15K

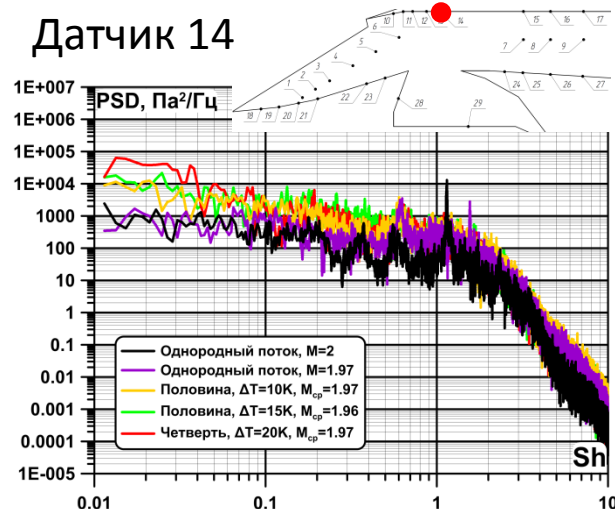


Более интенсивный замыкающий прямой скачок на расчетном режиме ведет к росту пульсаций в дозвуковом диффузоре. На поле OASPL для **ΔT=20K** у верхней стенки видна область повышенных пульсаций, вызванная отрывом течения.

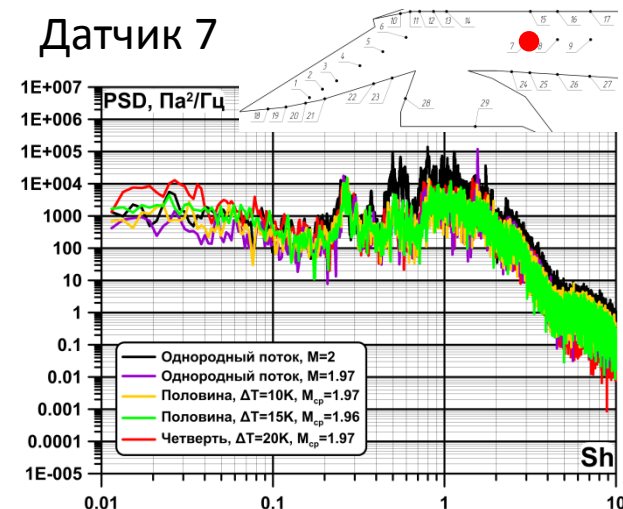
Датчик 22



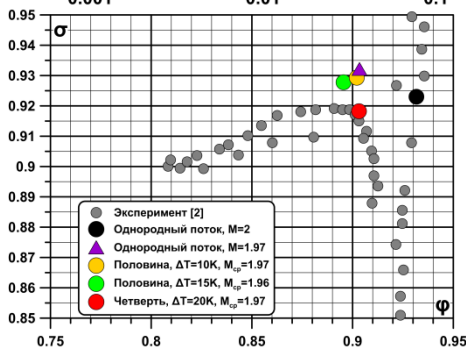
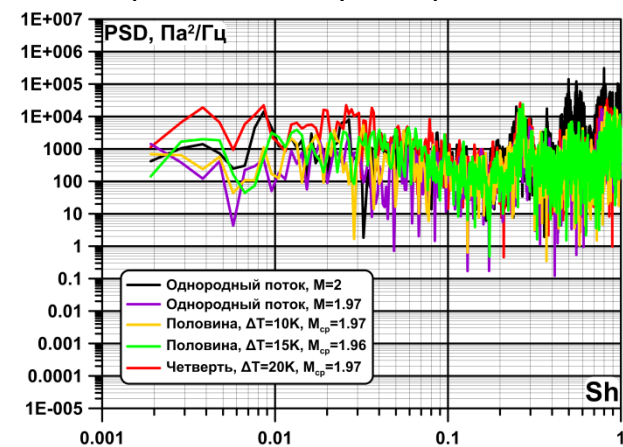
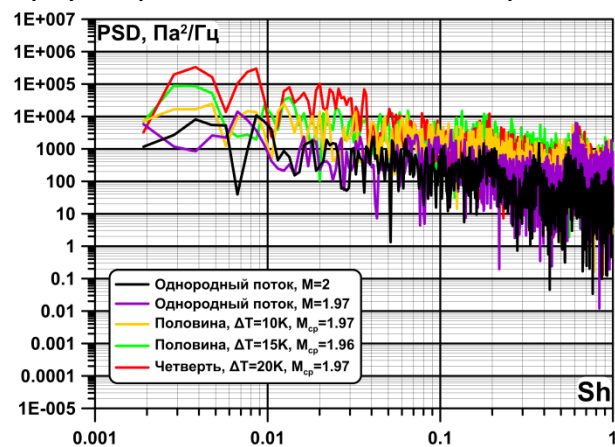
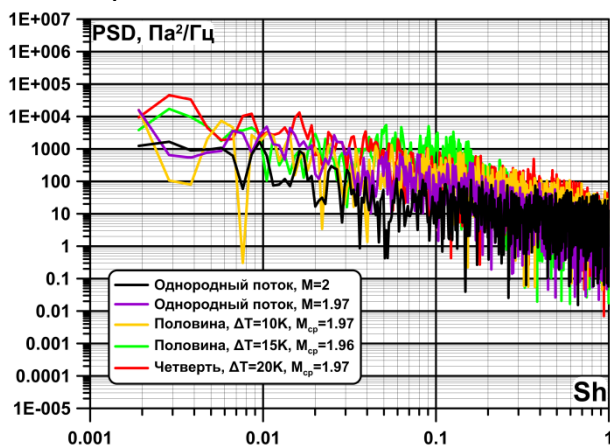
Датчик 14



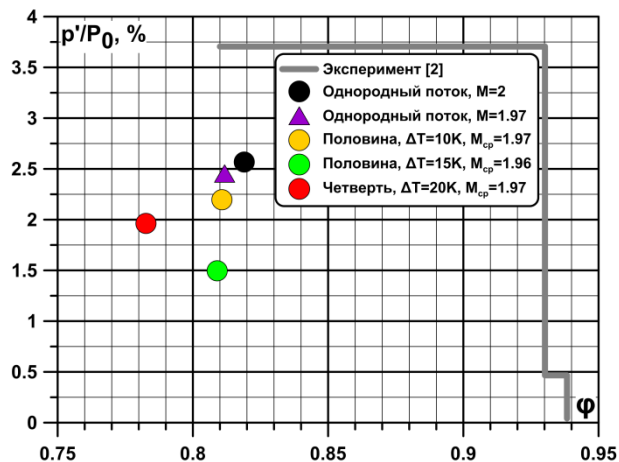
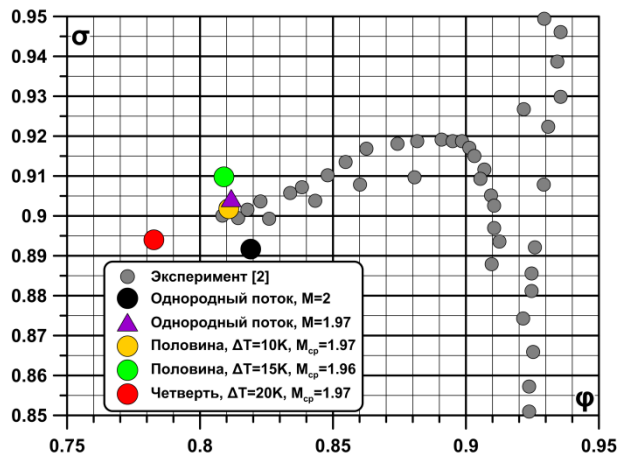
Датчик 7



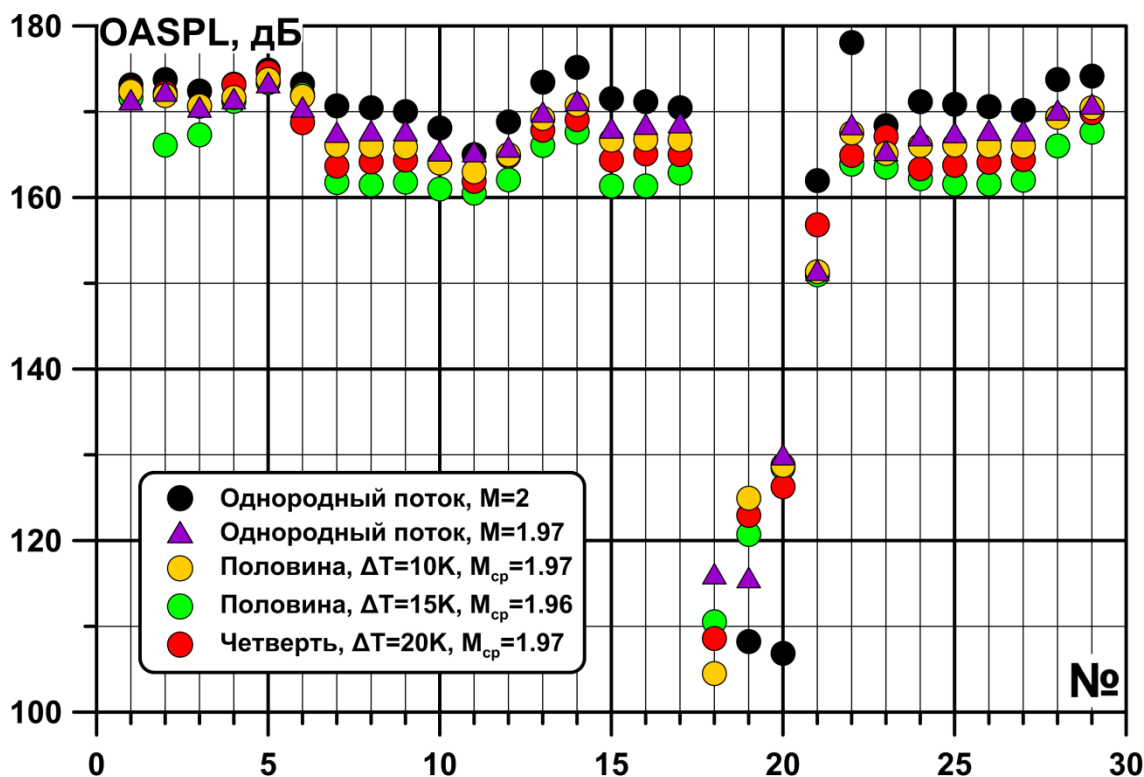
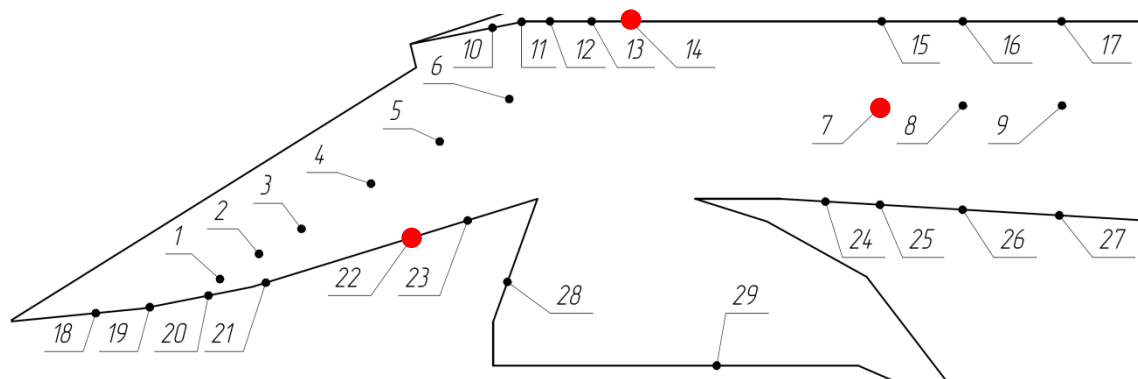
Спектральная плотность мощности. Сверху: осреднение небольших временных интервалов. Снизу: вся реализация.



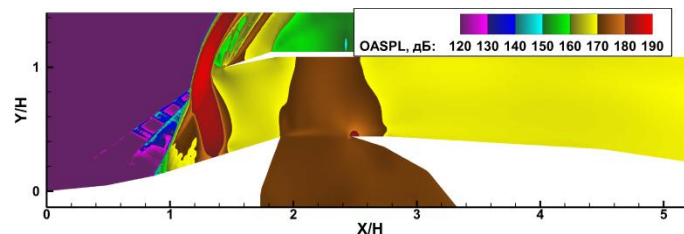
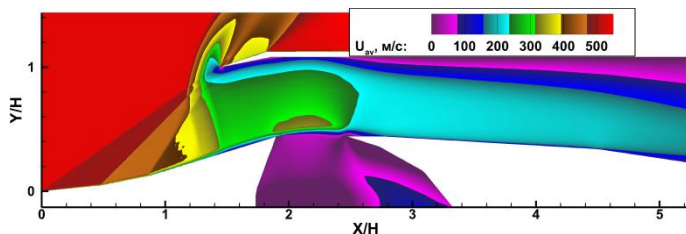
В спектрах датчика 14 на числах Струхала $Sh=0.6$ на всех нерасчетных режимах видны пики. При $M=2$ этот пик смещен до $Sh=0.55$ (2940 Гц), и имеются другие на $Sh=0.37$ (1980 Гц) и $Sh=1.15$ (6150 Гц). Во всех конфигурациях в спектре датчика 7 кроме подъема у $Sh=1$ есть локальные повышения интенсивности на $Sh=0.26$, 0.5 (1390 и 2670 Гц), более интенсивные при $M=2$. При однородном набегающем потоке с $M=1.97$ в датчике 22 на $Sh=2, 3, 4$ видны дискретные частоты.



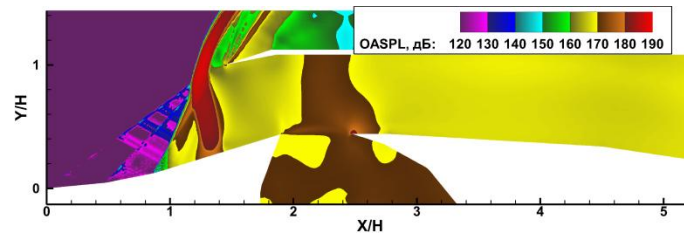
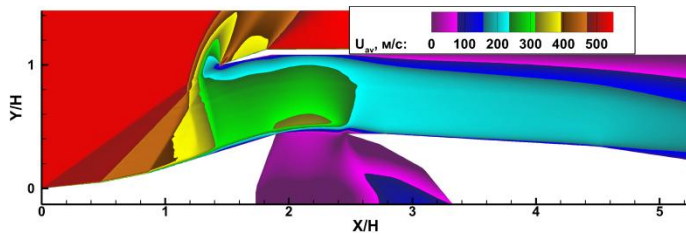
Во всем канале ВЗ, кроме первых двух клиньев торможения, уровень пульсаций находится в пределах 160–180 дБ.



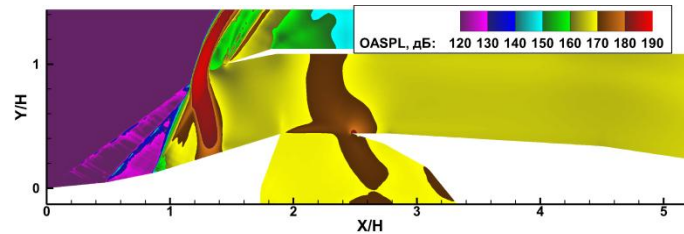
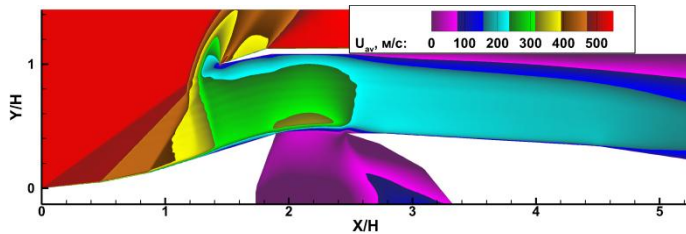
M=2



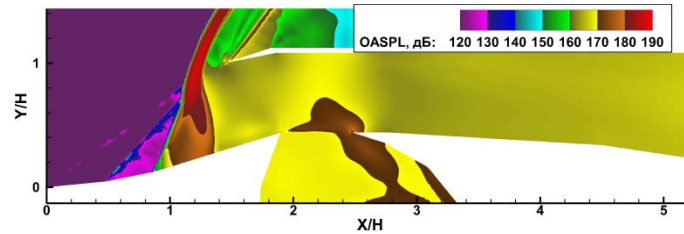
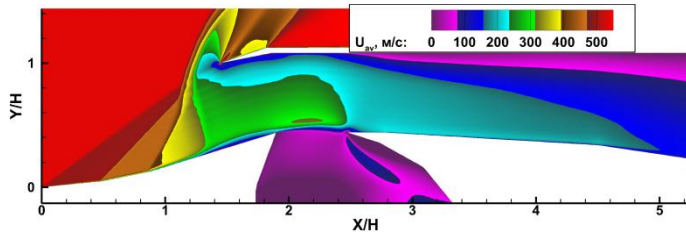
ΔT=5K



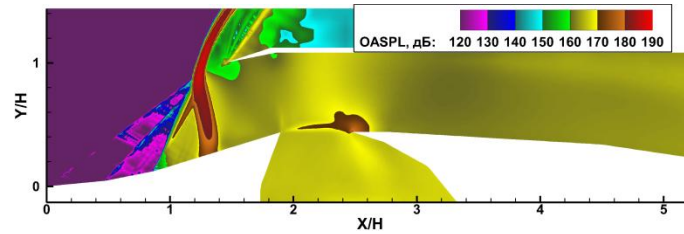
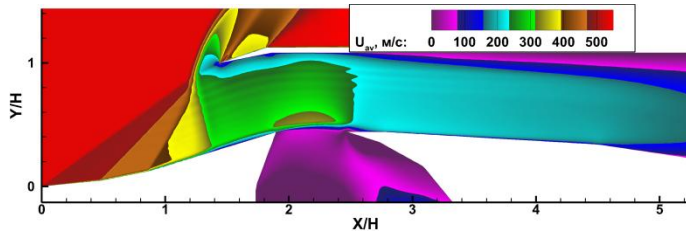
ΔT=10K



ΔT=20K

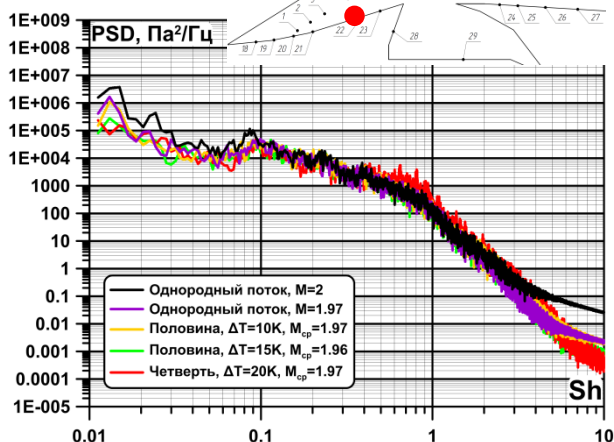


ΔT=15K

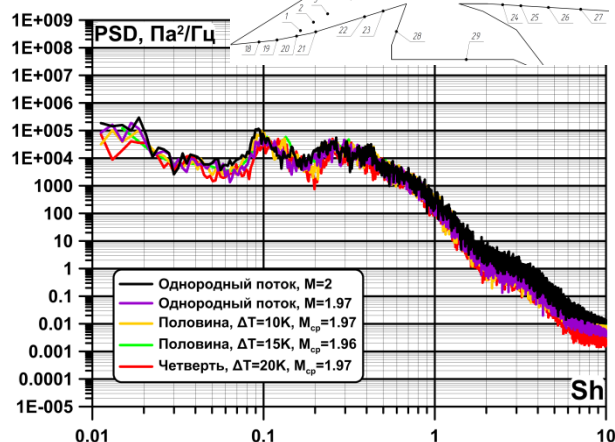


На картинах распределения OASPL в сечении видно, что по каналу ВЗ уровень пульсаций меняется слабо, внутренний максимум пульсаций находится на кромке полости слива пограничного слоя. Снаружи имеются области интенсивных пульсаций давления, возникшие из-за циклического движения прямого скачка.¹⁶

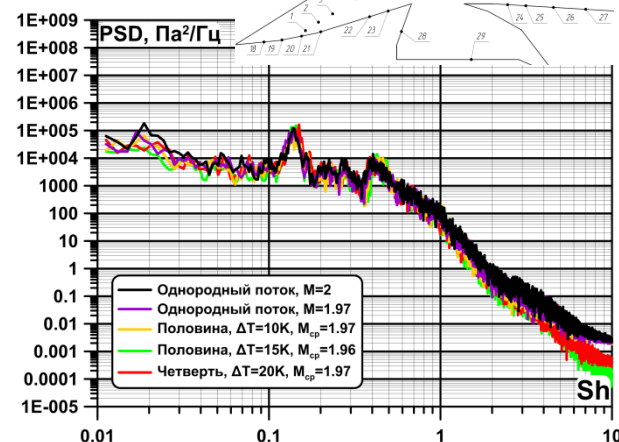
Датчик 22



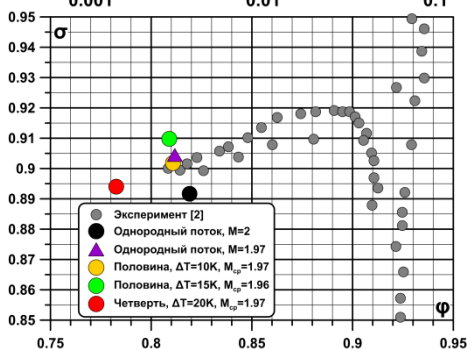
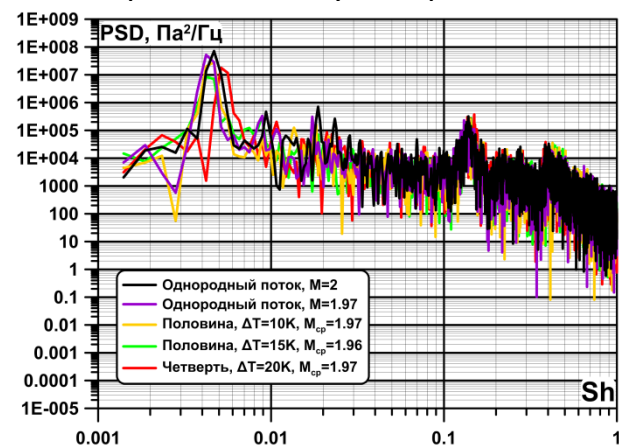
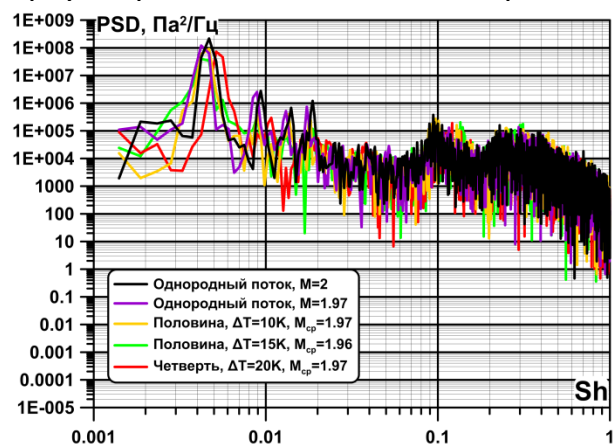
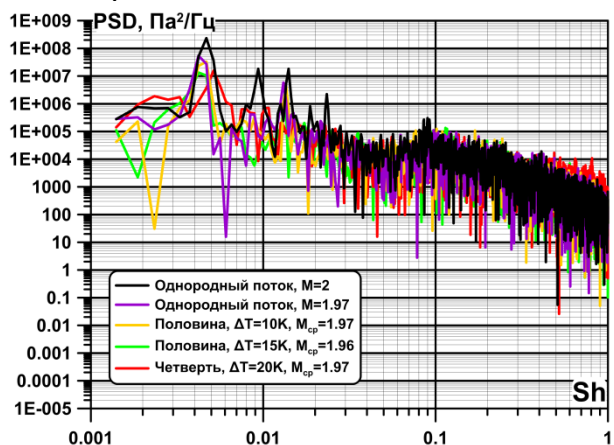
Датчик 14



Датчик 7



Спектральная плотность мощности. Сверху: осреднение небольших временных интервалов. Снизу: вся реализация.



В низкочастотной части спектра в диапазоне $Sh=0.0042-0.0051$ (22.5–27.3 Гц) находятся максимумы спектров, соответствующие частотам помпажа. Имеются менее интенсивные дискретные частоты, кратные 2-м, 3-м и 4-м частотам помпажа, особенно хорошо они различимы в спектрах датчика 14. Для варианта с $\Delta T=20K$ пики с кратной частотой не такие интенсивные, при том, что для него представлены результаты при большем дросселировании, чем у остальных вариантов. В датчике 14 на частотах $Sh=0.09$ и 0.26 (480 и 1390 Гц) есть слабо выраженные локальные максимумы. При этом в спектрах датчика 7 есть более выделяющиеся пики на частотах в ≈ 1.5 раза больших — $Sh=0.14$ и 0.4 (750 Гц и 2140 Гц).

- RANS/ILES-методом исследовано влияние формы и степени неоднородности в поле температуры набегающего сверхзвукового потока на уровень и спектральные характеристики пульсаций давления в воздухозаборнике смешенного сжатия.
- На критических и сверхкритических режимах наибольший уровень пульсаций давления (>170 дБ) на стенках канала наблюдается в горле (датчик №6) и полости системы слива пограничного слоя (датчик №29).
- При помпаже уровень пульсаций давления на стенках по всему каналу ВЗ находится в диапазоне 160–180 дБ, значительно меньше (<130 дБ) интенсивность пульсаций на первых двух поверхностях сверхзвукового торможения, поскольку выбитый прямой скачок находится на третьем клине, не достигая первых двух, более $2/3$ цикла помпажа.
- На помпажном режиме на интенсивность пульсаций давления на стенках в первую очередь влияет число Маха набегающего потока.
- Полость слива пограничного слоя является источником пульсаций давления из-за возникновения над ней слоя смешения и его взаимодействия со скачками уплотнения и задней кромкой полости системы слива. На сверхкритических режимах полость слива генерирует интенсивное излучение (OASPL >170 дБ) на частотах $Sh=0.37$, 0.5 – 0.6 , 0.8 (1980, 2670–3205, 4275 Гц), в широком диапазоне при $Sh \approx 1$ (5345 Гц) и на частотах, кратными этим.
- Спектры пульсаций давления на помпаже сильно отличаются от критического и сверхкритического режимов. Основная часть энергии пульсаций давления сосредоточена в низкочастотных помпажных колебаниях при $Sh \approx 0.0047$ (25 Гц) и кратным ему частотам.

Спасибо за внимание

Литература

1. Любимов Д.А. Разработка и применение метода высокого разрешения для расчета струйных течений метод крупных вихрей. // ТВТ. 2012. Т 50. №3. С. 450–466.
2. Trapier S., Duveau P., Sebastien Deck S. Experimental Study of Supersonic Inlet Buzz // AIAA J. 2006. V. 44. № 10. P. 2354.