

Ульяновский государственный технический университет

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИЕМНИКОВ ВОЗДУШНЫХ ДАВЛЕНИЙ**

М.М. Дубинина, магистрант кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы» Ульяновского государственного технического университета (каф. «ИВК» УлГТУ)

М.Ю. Сорокин, к.т.н., доцент каф. «ИВК» УлГТУ

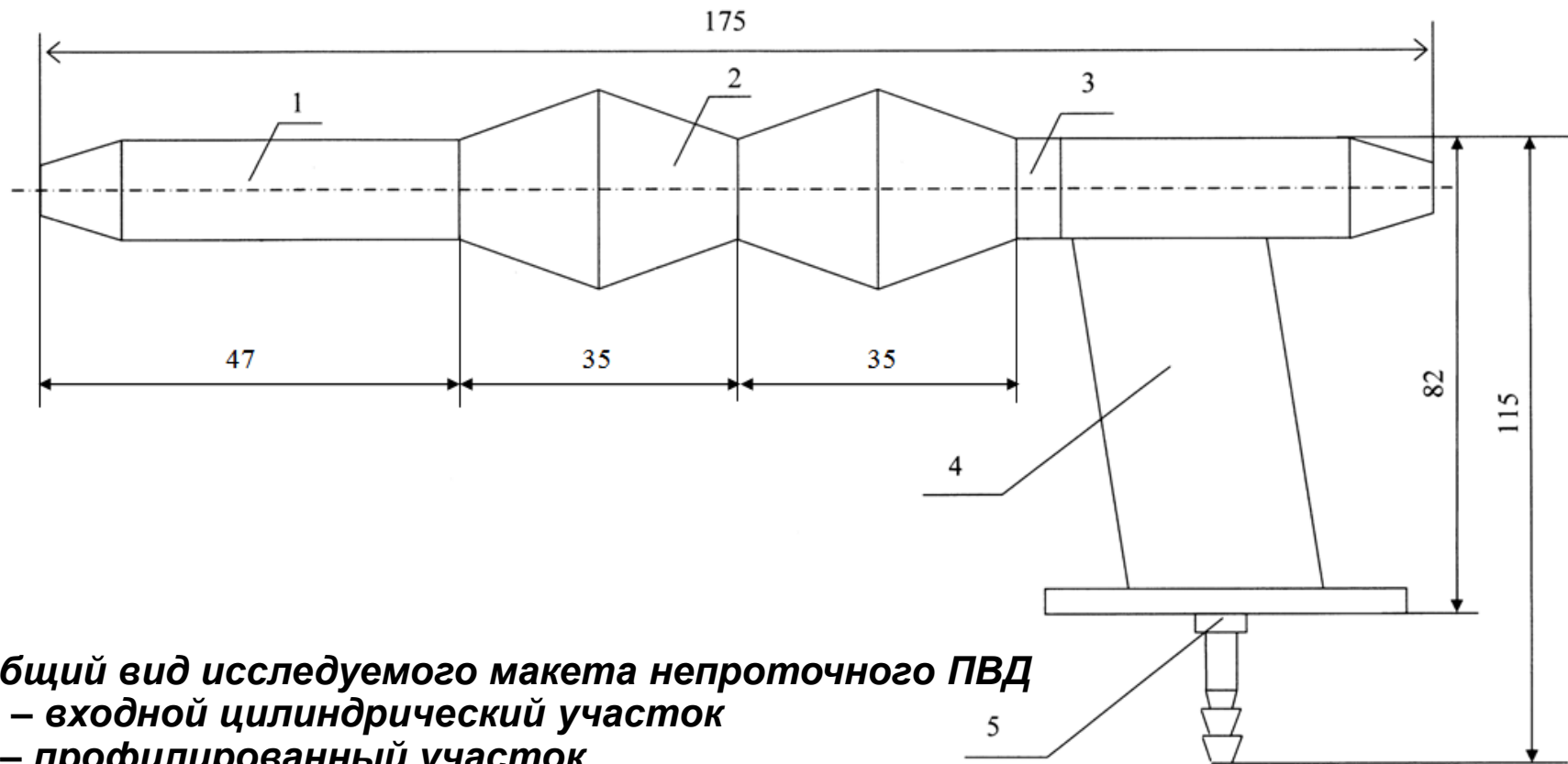
# Цель работы

---

Целью работы является:

- проведение математического моделирования приемника воздушного давления с компенсационным контуром;
- сравнение с данными, полученными в ходе эксперимента.

# Исследуемый приемник воздушных давлений



- **Общий вид исследуемого макета непроточного ПВД**
- **1 – входной цилиндрический участок**
- **2 – профилированный участок**
- **3 – контрольная гайка**
- **4 – крепежный кронштейн**
- **5 – штуцер отбора статического давления**
- **Диаметр приемника 12 мм, диаметр гофрированной части – 18 мм**

# Проведение эксперимента

**Отбор давления производился следующим образом.**

*1. 8 отверстий диаметром 1.5 мм, шаг по длине приемника 5 мм.*

*2. Щель шириной 0.5 мм, имеющей вид кругового сектора с углом  $90^\circ$ , шаг по длине приемника 0.5 мм.*



Отметим, что в силу отсутствия достоверных данных по величине турбулентности потока аэродинамической трубы при математическом моделировании принята низкая турбулентность набегающего потока.

# Математическое моделирование Flow Vision

---

## Параметры моделирования

Опорное давление – 101325 Па

Температура - +15°C

Турбулентность потока – 1 %

Диапазон скоростей – 100, 150 и 200 км/ч

## Граничные условия

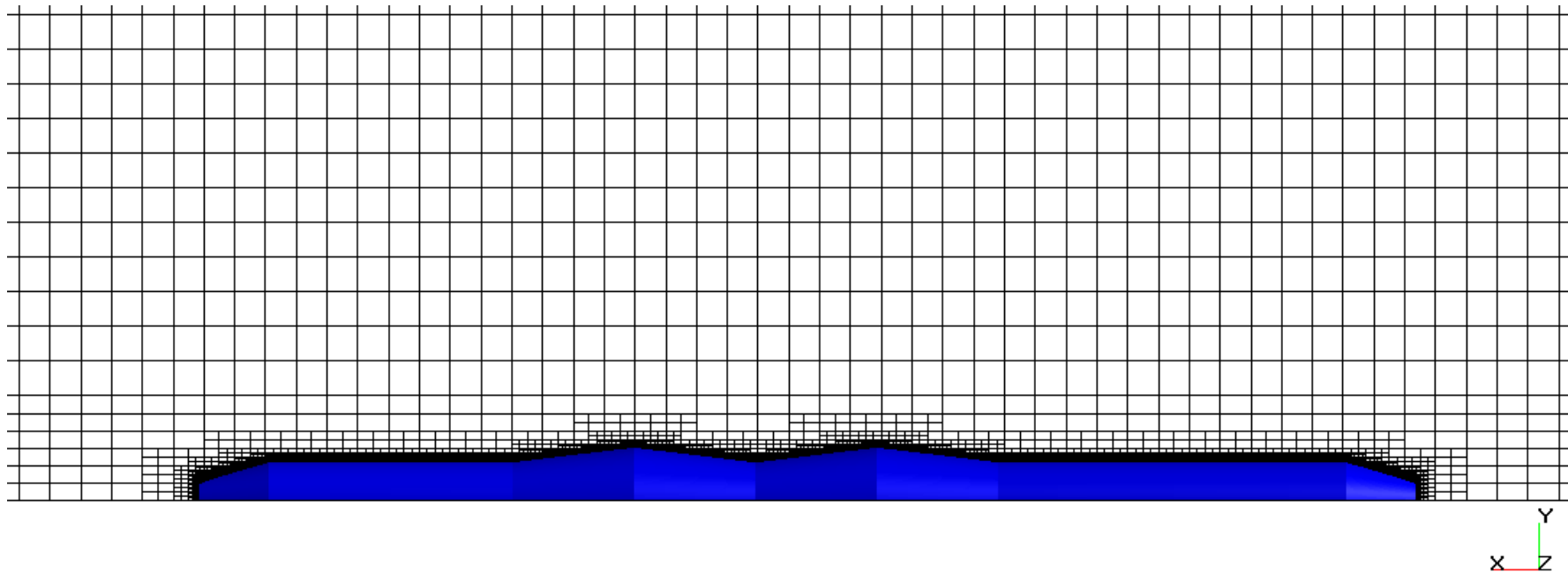
Вход – массовая скорость в соответствии с  
указанными скоростями

Поверхность приемника – стенка с логарифмическим  
законом распределения скорости

Выход - граничное условие равенства нулю  
относительного давления

При математическом моделировании использовались модели турбулентности Shear Stress Transport (SST) и Spalart-Allmaras (SA).

# Расчетная сетка



Общее количество ячеек расчетной сетки  $\sim 250$  тысяч

По поверхности приемника выполнена адаптация 4-го порядка

# Математическое моделирование Open FOAM

---

## Параметры моделирования

Опорное давление – 101325 Па

Температура - +15°C

Турбулентность потока – 1 %

Диапазон скоростей – 100, 150 и 200 км/ч

## Граничные условия

Вход – скорость в соответствии с указанными скоростями

Поверхность приемника – стенка с логарифмическим  
законом распределения скорости

Выход - граничное условие равенства нулю

относительного давления

При математическом моделировании использовались модели турбулентности Shear Stress Transport (SST) и Spalart-Allmaras (SA).

# Начальные условия

**U:** internalField uniform (27.7778 0 0);  
*Вход:* type fixedValue; value \$internalField;  
*Выход:* type inletOutlet;  
inletValue uniform (0 0 0);  
value \$internalField;  
*Симметрия:* type symmetryPlane;  
*Приемник:* type fixedValue; value uniform (0 0 0);

**p:** internalField uniform 0;  
*Вход:* type zeroGradient;  
*Выход:* type fixedValue;  
value \$internalField;  
*Симметрия:* type symmetryPlane;  
*Приемник:* type zeroGradient;

**k:** internalField uniform 0.039;  
*Вход:* type fixedValue;  
value \$internalField;  
*Выход:* type inletOutlet;  
inletValue \$internalField;  
value \$internalField;  
*Симметрия:* type symmetryPlane;  
*Приемник:* type kqRWallFunction;  
value uniform 0;

**omega:** internalField uniform 3.928;  
*Вход:* type fixedValue;  
value \$internalField;  
*Выход:* type inletOutlet;  
inletValue \$internalField;  
value \$internalField;  
*Симметрия:* type symmetryPlane;  
*Приемник:* type omegaWallFunction;  
value \$internalField;

**nut:** internalField uniform 0.01;  
*Вход:* type calculated; value uniform 0;  
*Выход:* type calculated; value uniform 0;  
*Симметрия:* type symmetryPlane;  
*Приемник:* type nutUSpaldingWallFunction;  
value uniform 0;



# Используемые схемы

## fvSchemes:

ddtSchemes:

default steadyState;

gradSchemes:

default Gauss linear;

divSchemes:

default Gauss upwind;

div(phi,U) Gauss linearUpwindV grad(U);

div((nuEff\*dev(T(grad(U)))))) Gauss linear;

laplacianSchemes:

default Gauss linear corrected;

interpolationSchemes:

default linear;

interpolate(U) linear;

snGradSchemes:

default corrected;

fluxRequired:

default no;

p ;

# Настройки решения

**fvSolution:** solvers: p

```
{solver GAMG; tolerance 1e-12;  
relTol 0.01;  
smoother GaussSeidel;  
nPreSweeps 0; nPostSweeps 2;  
cacheAgglomeration true;  
nCellsInCoarsestLevel 10;  
agglomerator faceAreaPair;  
mergeLevels 1; };
```

**"(U|k|epsilon|omega|nuTilda)"**

```
{solver smoothSolver; tolerance 1e-12;  
smoother GaussSeidel;  
relTol 0.1; nSweeps 2; };
```

SIMPLE {

```
nNonOrthogonalCorrectors 2;  
pRefCell 0; pRefValue 0;  
residualControl { p 1e-5; U 1e-5;  
"(k|epsilon|omega|nuTilda)" 1e-5; }
```

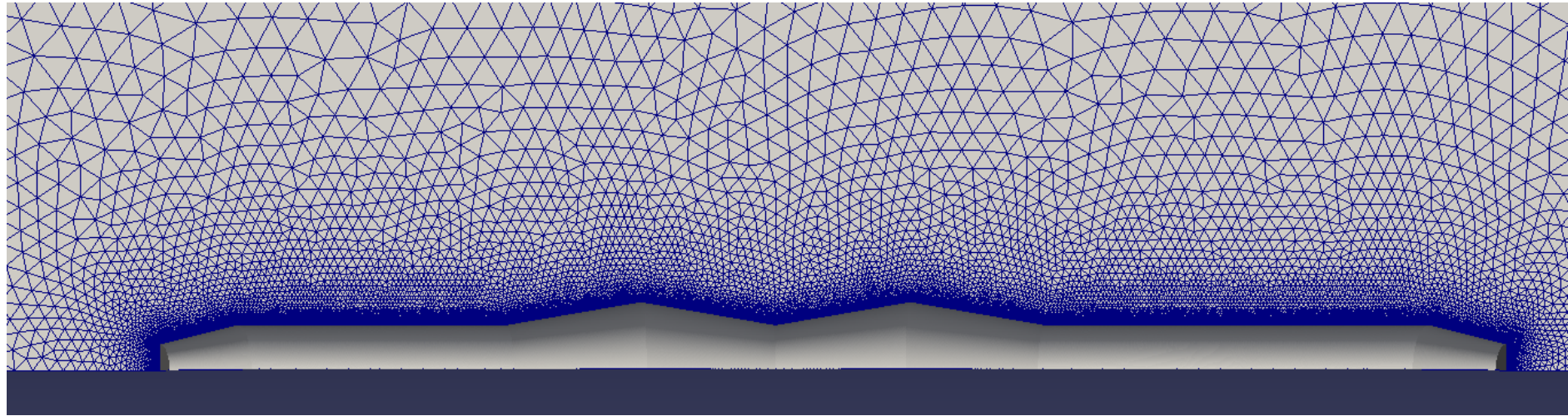
potentialFlow {

```
nNonOrthogonalCorrectors 15;}
```

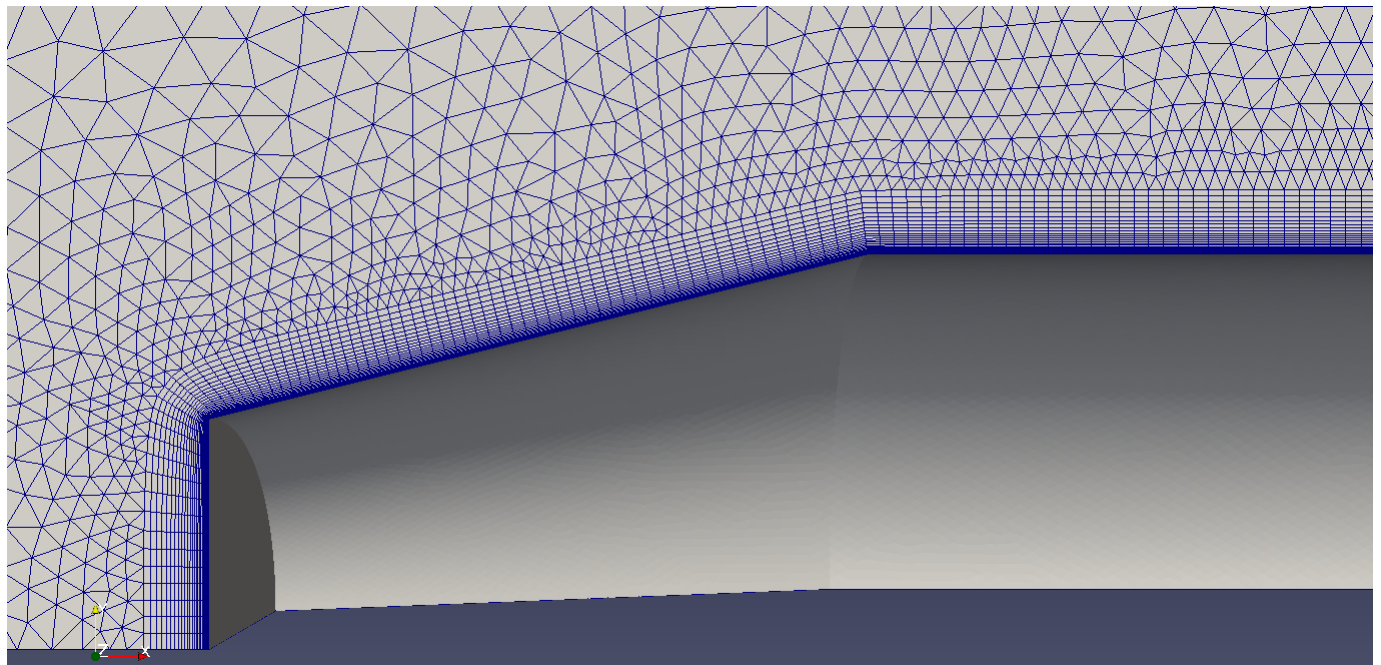
relaxationFactors {

```
default 0;  
p 0.2; U 0.6;  
"(k|epsilon|omega|nuTilda)" 0.3;}
```

# Расчетная сетка



Общее количество  
ячеек расчетной  
сетки -  
**4 893 206**



# Значение параметра $y^+$

---

## **100 км/ч:**

pvd  $y^+$  : min: 0.000144355 max: 0.221178 average: 0.0157939

gofr  $y^+$  : min: 0.000701532 max: 0.153088 average: 0.0161839

## **150 км/ч:**

pvd  $y^+$  : min: 0.0278551 max: 2.11339 average: 0.54257

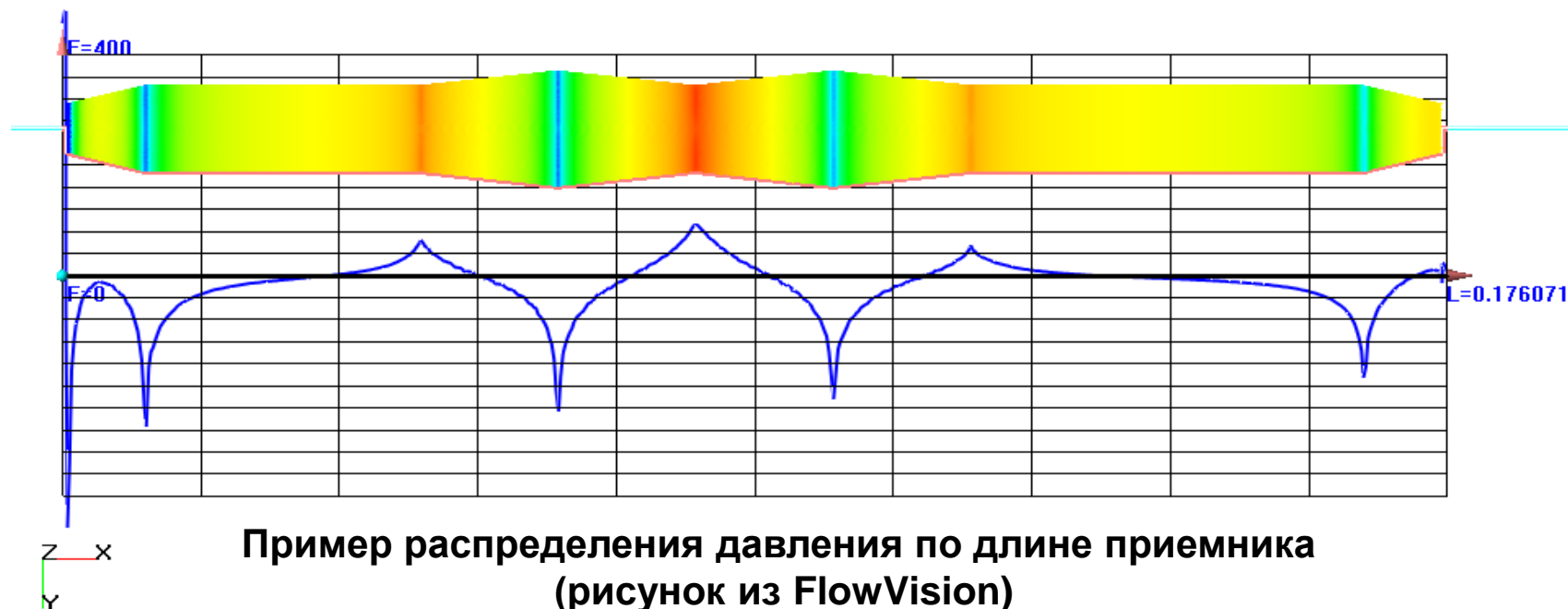
gofr  $y^+$  : min: 0.0258555 max: 1.77257 average: 0.526169

## **200 км/ч:**

pvd  $y^+$  : min: 0.0342598 max: 2.61252 average: 0.701618

gofr  $y^+$  : min: 0.0289171 max: 2.27708 average: 0.675537

# Результаты моделирования



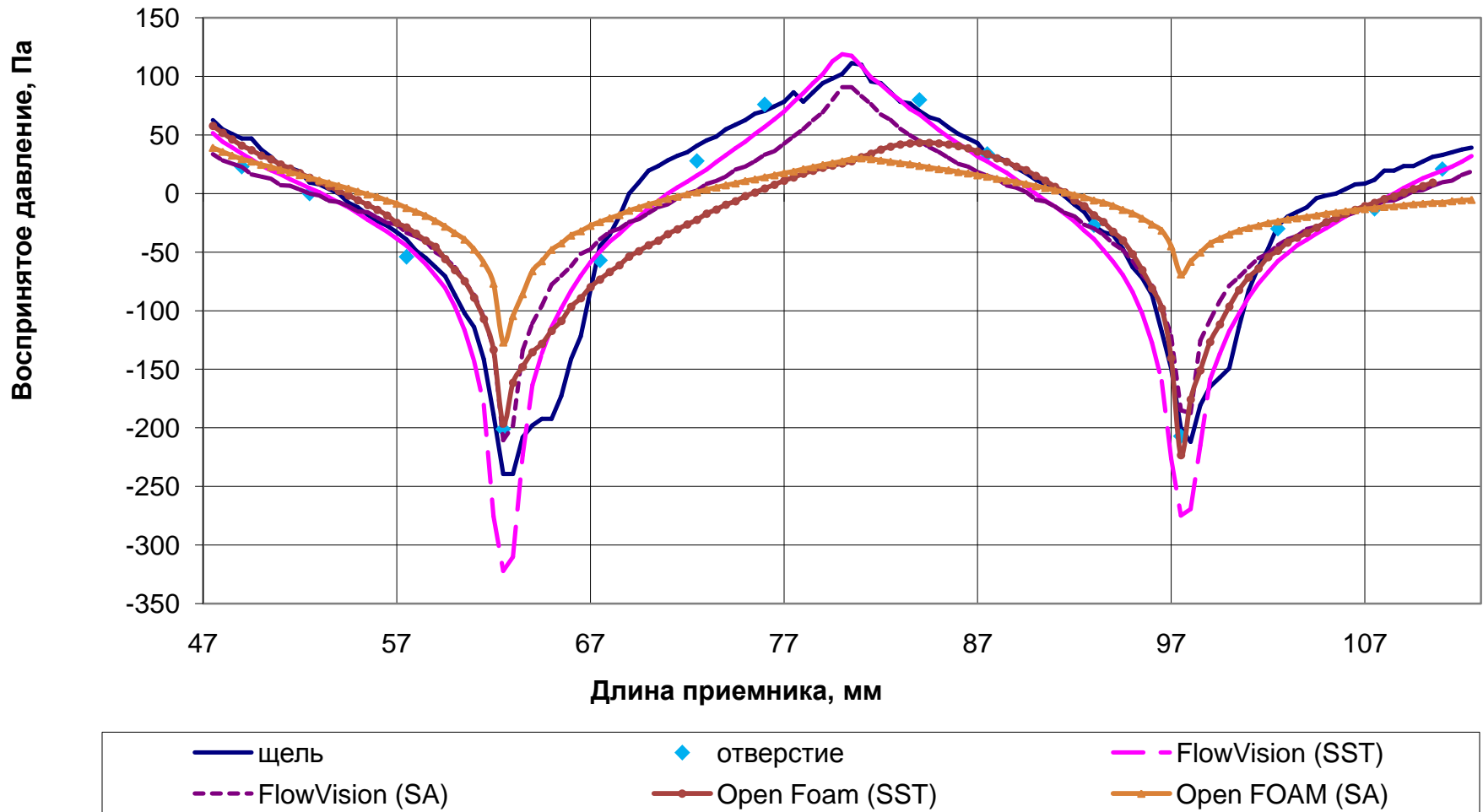
**Пример распределения давления по длине приемника  
(рисунок из FlowVision)**

В таблице далее приведены результаты экспериментов и математического моделирования («щель» – соответствует случаю отбора давления щелью, «отв.» – соответствует случаю отбора давления отверстиями, «FV SST» – математическое моделирование с использованием SST-модели турбулентности программе Flow Vision, «FV SA» – математическое моделирование с использованием SA-модели турбулентности программе Flow Vision, «OF SST» и «OF SA» соответственно в программе Open FOAM). Длина приемника отсчитывается от носовой части, все воспринятые давления приведены в Паскалях относительно давления невозмущенного потока.

# Результаты моделирования

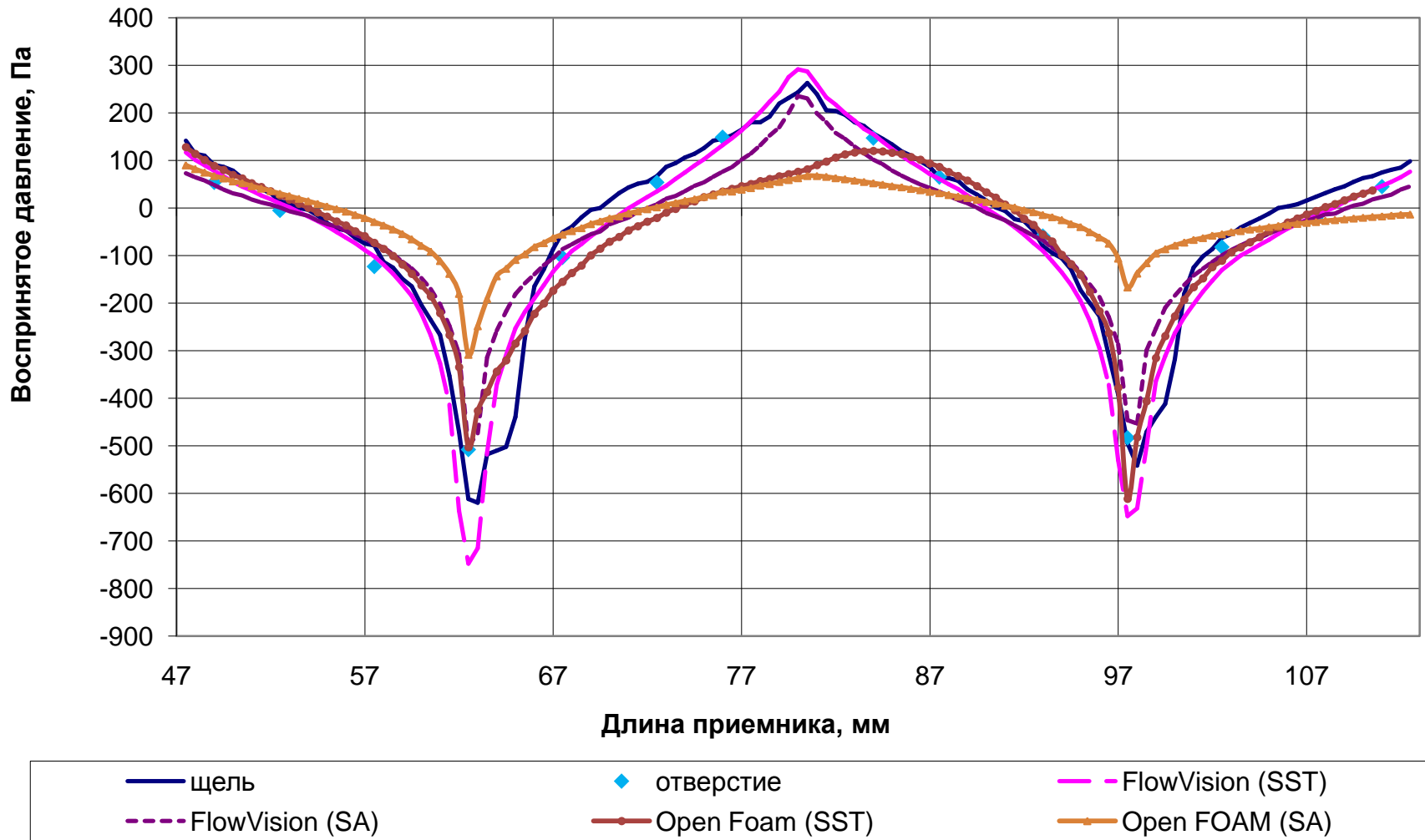
Длина L, мм	100 км/ч						150 км/ч						200 км/ч					
	щель	отв.	FV SST	FV SA	OF SST	OF SA	щель	отв.	FV SST	FV SA	OF SST	OF SA	щель	отв.	FV SST	FV SA	OF SST	OF SA
<b>49</b>	47	23	34	23	41	30	90	54	78	48	89	68	188	93	139	86	156	125
<b>52,2</b>	9	0	5	0	14	14	14	-5	10	1	27	30	16	-32	17	1	45	55
<b>57,5</b>	-39	-54	-44	-34	-29	-12	-78	-123	-102	-76	-73	-29	-196	-223	-183	-138	-134	-56
<b>62,5</b>	-239	-201	-322	-210	-196	-127	-612	-508	-748	-501	-503	-308	-1162	-986	-1358	-921	-942	-585
<b>67,5</b>	-45	-57	-50	-39	-73	-24	-51	-104	-111	-87	-155	-56	-102	-165	-207	-156	-261	-101
<b>72,5</b>	41	28	15	2	-22	1	67	54	35	8	-21	2	118	82	63	17	-21	4
<b>76</b>	71	76	57	33	4	14	145	149	132	76	35	35	263	217	238	137	74	58
<b>84</b>	71	80	68	45	43	24	157	147	155	102	120	52	275	242	279	183	202	97
<b>87,5</b>	33	34	27	15	34	14	64	65	61	34	87	31	122	101	109	61	127	58
<b>93</b>	-27	-27	-39	-30	-18	-6	-80	-59	-90	-68	-55	-15	-153	-126	-162	-123	-104	-27
<b>97,5</b>	-200	-207	-275	-185	-223	-69	-494	-483	-648	-446	-611	-167	-1032	-896	-1182	-824	-1063	-316
<b>102,5</b>	-27	-30	-58	-44	-49	-24	-63	-82	-130	-100	-111	-55	-141	-160	-237	-180	-188	-97
<b>107,5</b>	12	-13	-8	-10	-8	-12	24	-21	-16	-21	-6	-29	35	-34	-28	-38	-2	-50
<b>111</b>	33	21	20	10	12	-8	75	45	47	23	43	-18	136	70	85	43	93	-28

# Результаты моделирования



**Распределение давления по длине профилированного участка при скорости набегающего потока 100 км/ч**

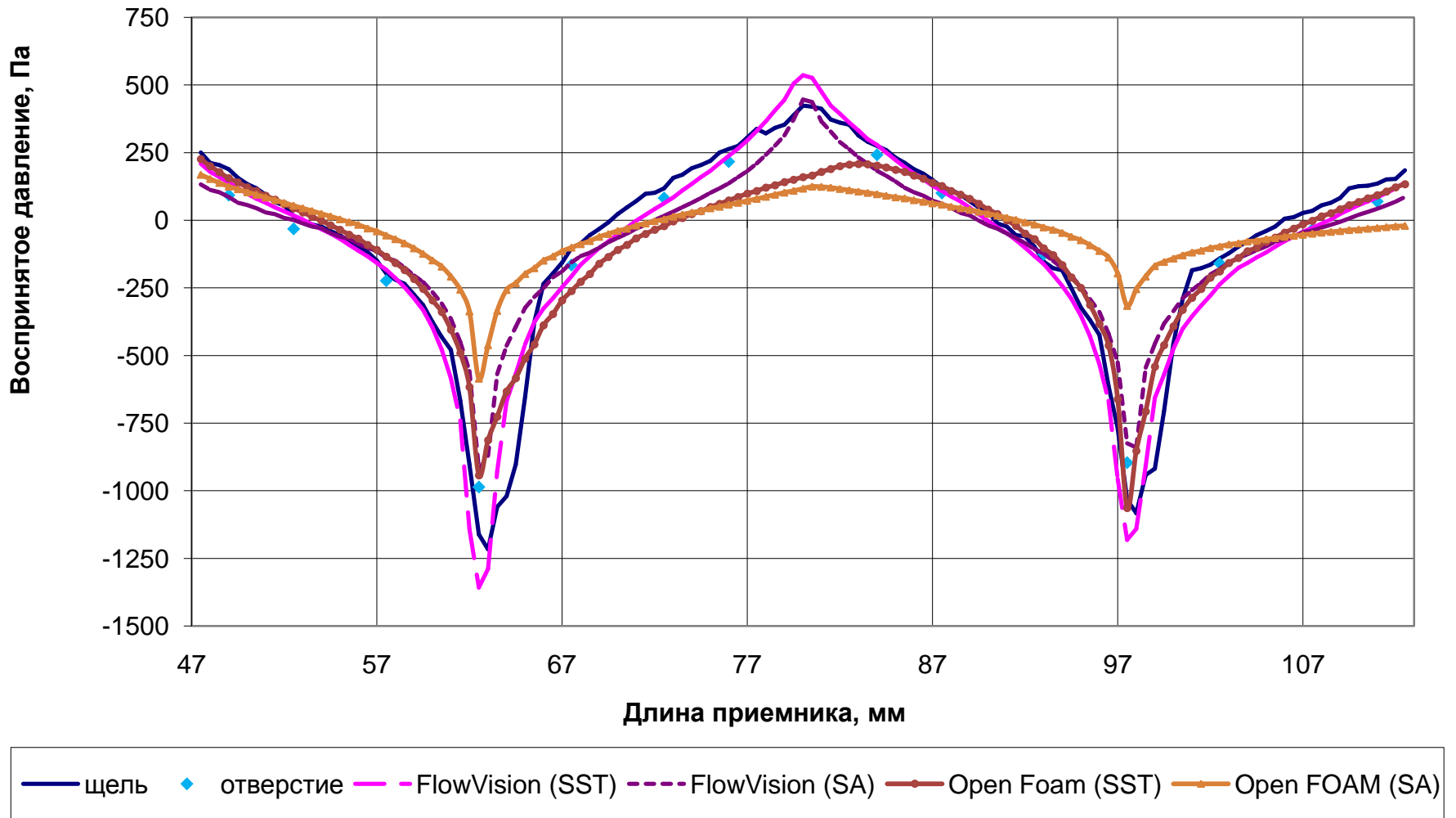
# Результаты моделирования



**Распределение давления по длине профилированного участка при скорости набегающего потока 150 км/ч**



# Результаты моделирования



**Распределение давления по длине профилированного участка при скорости набегающего потока 200 км/ч**

# Анализ результатов исследования

---

**Факторы, влияющие на сходимость результатов:**

- значительное расхождение наблюдается на задних гофрах, где возможно образование вихрей;
- ввиду того, что диаметр отверстий для отбора давления составляет 1.5 мм, то происходит некоторое усреднение давления на этом участке;
- отсутствует достоверная информация о величине турбулентности потока в аэродинамической трубе и её зависимости от скорости.

**В целом получены удовлетворительные результаты.**

**В дальнейших планах проведение исследований влияния используемых типов конечных элементов (тетра-, гекса- и т.д.), применяемых схем (1-го или 2-го порядка), граничных условий и типов решателей на получаемые результаты в программе OpenFOAM.**

**Спасибо за внимание!**