

Применение FlowVision 3.09 для моделирования течения в ветроэнергетической установке, испытанной в NREL



FlowVision

П.М. Бывальцев, К.В. Кузнецов, И.В. Москалев, В.И. Похилко
ООО «ТЕСИС», Москва

www.flowvision.ru

Cloud Yu, Samwells Testing Inc., Тайвань

www.samwells.com

Команда испытателей в NREL и экспериментальное оборудование



NREL - National Renewable Energy Laboratory, NASA Ames Research Center.

* Нестационарные испытания ветроэнергетической установки (ВЭУ, ветровая турбина) проводились в гигантской прямоугольной аэродинамической трубе: высота - **24.4 м**, ширина - **36.6 м**.

* Была создана научная группа советников из аэродинамиков и экспертов по моделированию ВЭУ по всему миру, чтобы определить условия испытаний и максимизировать отдачу от испытаний.

* Параллельно испытаниям велось слепое тестирование расчетных программ. (*)

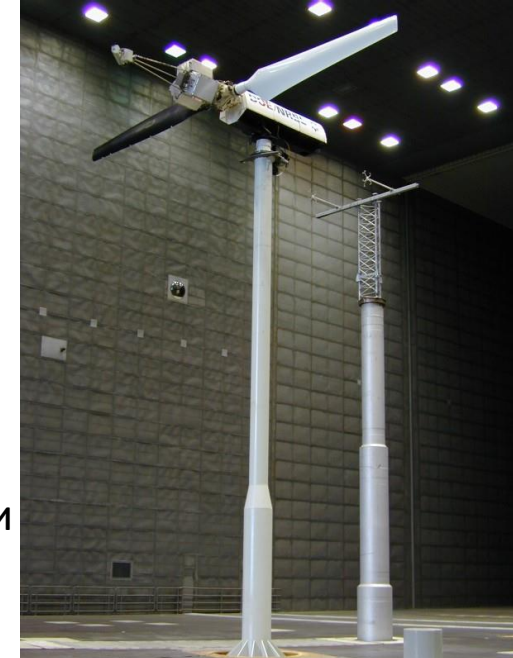
(*) Simms D., Schreck S., Hand M., Fingersh L.J. NREL Unsteady Aerodynamics Experiment in the NASA-Ames Wind Tunnel: A Comparison of Predictions to Measurements. Technical Report, June 2001



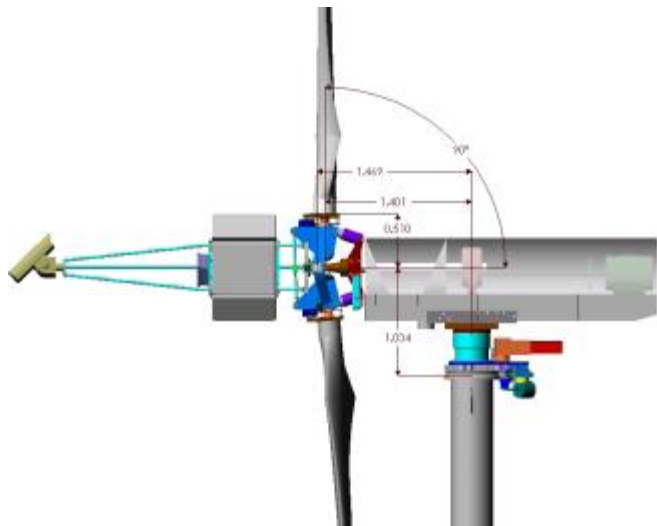
Основные параметры ВЭУ



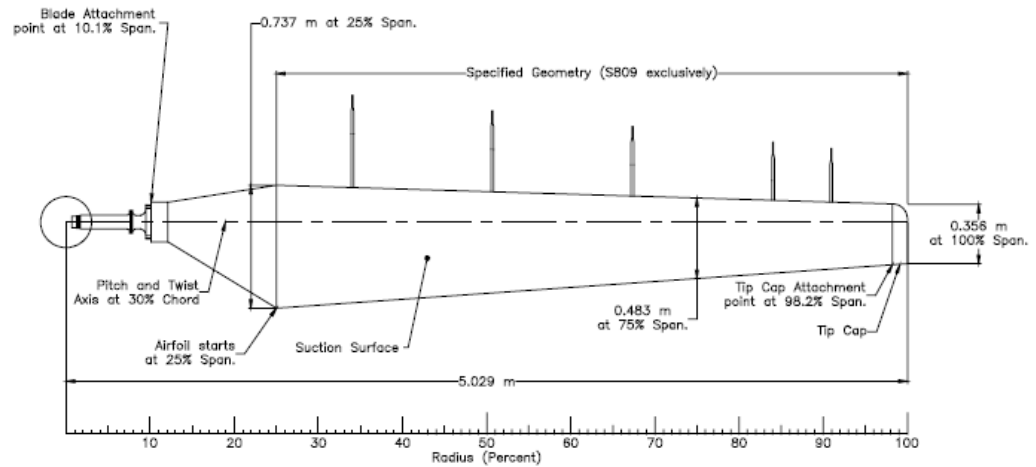
- Число лопастей: 2
- Диаметр ротора: 10.058 м
- Высота подъема установки: 12.192 м
- Скорость вращения: 71.63 об/мин
- Скорость ветра: от 6 м/с, в некоторых тестах - от 5 м/с
- Регулирование мощности: срыв
- Номинальная мощность: 19.8 кВт
- Ориентация ротора: против ветра
- Направление вращения: против часовой стрелки (если смотреть по направлению ветра)



Геометрия ротора

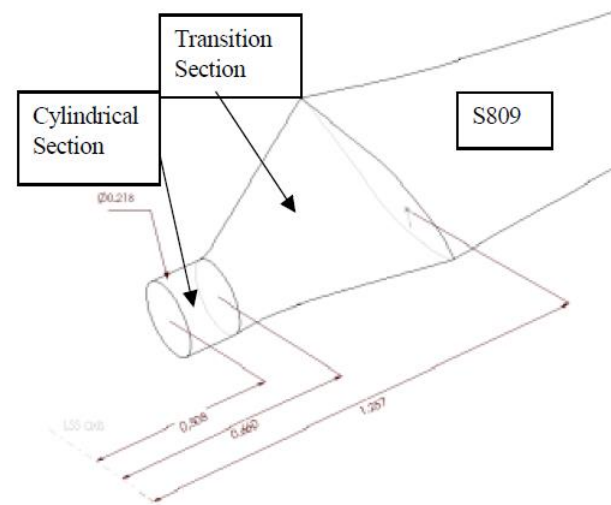


Ротор турбины, 0° угол конусности (размеры в метрах)



Геометрия

- Сечения лопасти в плане: профиль NREL S809, масштабированный и повернутый
- Длина участка от центра вращения до начала переходного участка: 0.883 m
- Угол установки профиля на конце : 3° (испытания серии S)



Изображение прикорневых поверхностей (размеры в метрах)

Описание испытаний

Матрица серий испытаний была составлена для проведения исследований в 2-х направлениях. Одно направление связано с имитацией работы установки, другое – со сбором информации для изучением специфических явлений. В таблице они нанесены с пометками (F) и (P), соответственно

Table 1. Test Matrix Overview

| Ordinal Number | Test Sequence | Upwind/Downwind | Rigid/Teetered | Cone Angle (deg) | Yaw Angle (deg) | Slow Yaw Sweep | Blade Tip Pitch (deg) | Parked/Rotating | RPM | Blade Press. | Probe Press. | Blade Tip | Day | NASA Run Number |
|----------------|---------------------------|-----------------|----------------|------------------|-----------------|----------------|-----------------------|-----------------|------|--------------|--------------|-----------|------------|-----------------|
| B | Downwind Baseline (F) | Downwind | Teetered | 3.4 | Locked | | 3.0 | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 1-4 | 11-14 |
| C | Downwind Low Pitch (F) | Downwind | Teetered | 3.4 | Locked | | 0.0 | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 1-4 | 11-14 |
| D | Downwind High Pitch (F) | Downwind | Teetered | 3.4 | Locked | | 6.0 | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 1-4 | 11-14 |
| E | Yaw Releases (P) | Downwind | Rigid | 3.4 | Locked / Free | | 3.0 | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 5 | 15, 16 |
| F | Downwind High Cone (F) | Downwind | Rigid | 18.0 | Locked | | 3.0 | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 6 | 17 |
| G | Upwind Teetered (F) | Upwind | Teetered | 0.0 | Locked | | 3.0 | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 8-9 | 34, 38 |
| H | Upwind Baseline (F) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked | X | 3.0 | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 9,11,12,15 | 39, 41-43, 50 |
| I | Upwind Low Pitch (F) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked | X | 0.0 | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 9,11,12 | 39, 41-43 |
| J | Upwind High Pitch (F) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked | X | 6.0 | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 9,11,12 | 39, 41-43 |
| K | Step AOA, Probes (P) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked at 0 | | Step & ramp | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 15 | 50 |
| L | Step AOA, Parked (P) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked at 0 | | Step & ramp | Parked | 0.0 | X | X | Baseline | 13 | 48 |
| M | Transition Fixed (P) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked | X | 3.0 | Rotating | 72.0 | X | | Baseline | 16 | 52 |
| N | Sin AOA, Rotating (P) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked at 0 | | Sinusoidal | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 14,15 | 49, 50 |
| O | Sin AOA, Parked (P) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked at 0 | | Sinusoidal | Parked | 0.0 | X | X | Baseline | 13 | 44-47 |
| P | Wake Flow Vis. Upwind (P) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked | | 3.0, 12.0 | Rotating | 72.0 | | | Visualize | 10,11 | 40, 41 |
| Q | Dynamic Inflow (P) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked at 0 | | Step | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 15 | 50 |
| R | Step AOA, No Probes (P) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked at 0 | | Step & ramp | Rotating | 72.0 | X | | Baseline | 16 | 52 |
| S | Upwind, No Probes (F) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked | X | 3.0 | Rotating | 72.0 | X | | Baseline | 16,18 | 52, 54 |
| T | Upwind, 2 deg Pitch (F) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked at 0 | | 2.0 | Rotating | 72.0 | X | | Baseline | 16,18 | 52, 54 |
| U | Upwind, 4 deg Pitch (F) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked at 0 | | 4.0 | Rotating | 72.0 | X | | Baseline | 16,18 | 52, 54 |
| V | Tip Plate (F) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked at 0 | | 3.0 | Rotating | 72.0 | X | | Plate | 18 | 54 |
| W | Extended Blade (F) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked at 0 | | 3.0 | Rotating | 72.0 | X | | Extended | 18 | 54 |
| X | Elevated RPM (F) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked at 0 | | 3.0 | Rotating | 90.0 | X | | Baseline | 19 | 55 |
| 3 | Tower Wake Measure (P) | Downwind | Rigid | 3.4 | Locked | | 53-79 | Parked | 0.0 | X | X | Baseline | 6 | 18 |
| 4 | Static Press. Cal (P) | Downwind | Teetered | 3.4 | Locked at 0 | | 3.0 | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 4 | 14 |
| 5 | Sweep Wind Speed (F,P) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked | | 3.0, 6.0 | Rotating | 72.0 | X | Both | Baseline | 11,19 | 43, 55 |
| 6 | Shroud Wake Measure (P) | Downwind | Rigid | 3.4 | Locked | | 61-74 | Parked | 0.0 | X | X | Baseline | 7 | 19 |
| 7 | Shroud Operating (P) | Downwind | Rigid | 3.4 | Locked | | 3.0 | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 7 | 20 |
| 8 | Downwind Sonics (F,P) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked | | 3.0 | Rotating | 72.0 | X | | Baseline | 17 | 53 |
| 9 | Sonic Validation (P) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked | | 3.0 | Rotating | 72.0 | | | Baseline | 17 | 53 |

(F) - Test conditions representative of field operation

(P) - Test conditions designed to explore specific flow physics phenomena



Описание испытаний

Матрица серий испытаний была составлена для проведения исследований в 2-х направлениях. Одно направление связано с имитацией работы установки, другое – со сбором информации для изучением специфических явлений. В таблице они нанесены с пометками (F) и (P), соответственно

Table 1. Test Matrix Overview

| Ordinal Number | Test Sequence | Upwind/ Downwind | Rigid/ Teetered | Cone Angle (deg) | Yaw Angle (deg) | Slow Yaw Sweep | Blade Tip Pitch (deg) | Parked/ Rotating | RPM | Blade Press. | Probe Press. | Blade Tip | Day | NASA Run Number |
|----------------|---------------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------|-----------------------|------------------|------|--------------|--------------|-----------|------------|-----------------|
| B | Downwind Baseline (F) | Downwind | Teetered | 3.4 | Locked | | 3.0 | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 1-4 | 11-14 |
| C | Downwind Low Pitch (F) | Downwind | Teetered | 3.4 | Locked | | 0.0 | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 1-4 | 11-14 |
| D | Downwind High Pitch (F) | Downwind | Teetered | 3.4 | Locked | | 6.0 | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 1-4 | 11-14 |
| E | Yaw Releases (P) | Downwind | Rigid | 3.4 | Locked / Free | | 3.0 | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 5 | 15, 16 |
| F | Downwind High Cone (F) | Downwind | Rigid | 18.0 | Locked | | 3.0 | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 6 | 17 |
| G | Upwind Teetered (F) | Upwind | Teetered | 0.0 | Locked | | 3.0 | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 8-9 | 34, 38 |
| H | Upwind Baseline (F) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked | X | 3.0 | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 9,11,12,15 | 39, 41-43, 50 |
| I | Upwind Low Pitch (F) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked | X | 0.0 | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 9,11,12 | 39, 41-43 |
| J | Upwind High Pitch (F) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked | X | 6.0 | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 9,11,12 | 39, 41-43 |
| K | Step AOA, Probes (P) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked at 0 | | Step & ramp | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 15 | 50 |
| L | Step AOA, Parked (P) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked at 0 | | Step & ramp | Parked | 0.0 | X | X | Baseline | 13 | 48 |
| M | Transition Fixed (P) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked | X | 3.0 | Rotating | 72.0 | X | | Baseline | 16 | 52 |
| N | Sin AOA, Rotating (P) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked at 0 | | Sinusoidal | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 14,15 | 49, 50 |
| O | Sin AOA, Parked (P) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked at 0 | | Sinusoidal | Parked | 0.0 | X | X | Baseline | 13 | 44-47 |
| P | Wake Flow Vis. Upwind (P) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked | | 3.0, 12.0 | Rotating | 72.0 | | | Visualize | 10,11 | 40, 41 |

| S | Upwind, No Probes (F) | Upwind | Rigid | 0.0 | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------|----------|----------|-----|-------------|--|----------|----------|------|---|------|----------|-------|--------|
| U | Upwind, 4 deg Pitch (F) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked at 0 | | 4.0 | Rotating | 72.0 | X | | Baseline | 16,18 | 52, 54 |
| V | Tip Plate (F) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked at 0 | | 3.0 | Rotating | 72.0 | X | | Plate | 18 | 54 |
| W | Extended Blade (F) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked at 0 | | 3.0 | Rotating | 72.0 | X | | Extended | 18 | 54 |
| X | Elevated RPM (F) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked at 0 | | 3.0 | Rotating | 90.0 | X | | Baseline | 19 | 55 |
| 3 | Tower Wake Measure (P) | Downwind | Rigid | 3.4 | Locked | | 53-79 | Parked | 0.0 | X | X | Baseline | 6 | 18 |
| 4 | Static Press. Cal (P) | Downwind | Teetered | 3.4 | Locked at 0 | | 3.0 | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 4 | 14 |
| 5 | Sweep Wind Speed (F,P) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked | | 3.0, 6.0 | Rotating | 72.0 | X | Both | Baseline | 11,19 | 43, 55 |
| 6 | Shroud Wake Measure (P) | Downwind | Rigid | 3.4 | Locked | | 61-74 | Parked | 0.0 | X | X | Baseline | 7 | 19 |
| 7 | Shroud Operating (P) | Downwind | Rigid | 3.4 | Locked | | 3.0 | Rotating | 72.0 | X | X | Baseline | 7 | 20 |
| 8 | Downwind Sonics (F,P) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked | | 3.0 | Rotating | 72.0 | X | | Baseline | 17 | 53 |
| 9 | Sonic Validation (P) | Upwind | Rigid | 0.0 | Locked | | 3.0 | Rotating | 72.0 | | | Baseline | 17 | 53 |

(F) - Test conditions representative of field operation

(P) - Test conditions designed to explore specific flow physics phenomena



Описание серии испытаний S

Эта серия проведена при условиях: **направление – против ветра, ротор без покачиваний и с 0° углом конусности**. Скорость ветра - от 5 м/с до 25 м/с. Угол рыскания - от 0° до 180°. Угол установки профиля на конце - 3°

Table C-18. Sequence S, Upwind, No Probes (F), 104 files of 30-second duration, 2 files of 6-minute duration

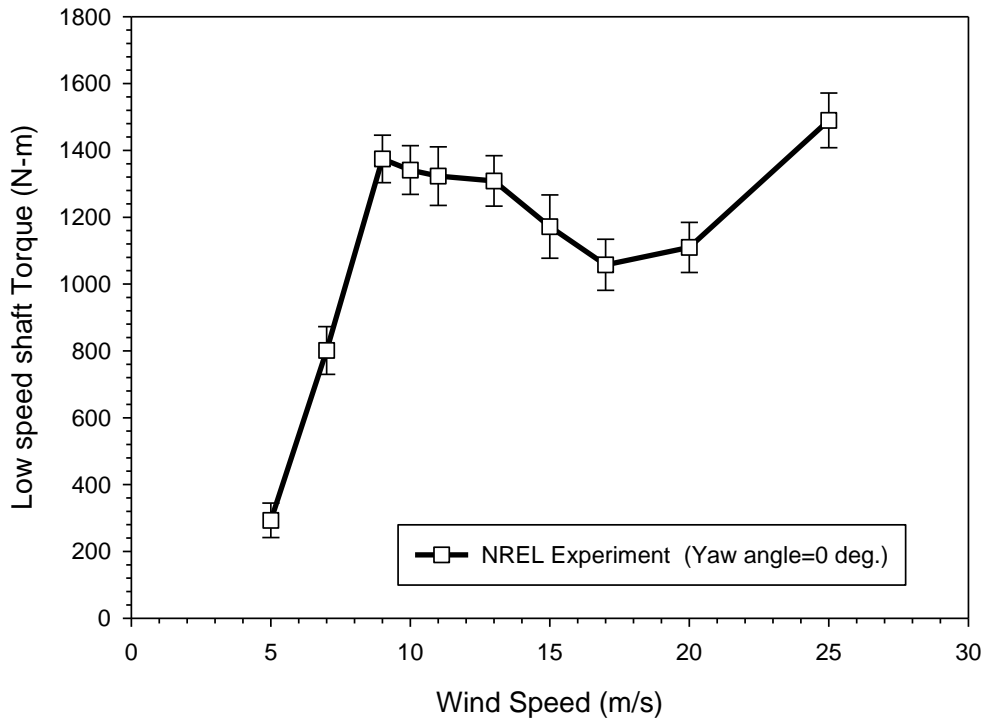
| Uw (m/s) | Yaw Angle | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-----------|---|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| | 0 | 5 | 10 | 20 | 30 | 45 | 60 | 75 | 90 | 135 | 180 | -135 | -90 | -75 | -60 | -45 | -30 | -20 | -10 | -5 |
| 5.0 | 0,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | |
| 6.0 | 0,1 | | 0 | | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7.0 | 0,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | |
| 8.0 | 0,1 | | 0 | | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9.0 | 0,1 | | 0 | | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10.0 | 0,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | |
| 11.0 | 0,1 | | 0 | | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12.0 | 0,1 | | 0 | | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13.0 | 0,1 | | 0 | | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14.0 | 0,1 | | 0 | | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15.0 | 0,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | |
| 16.0 | 0,1 | | 0 | | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17.0 | 0,1 | | 0 | | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18.0 | 0,1 | | 0 | | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19.0 | 0,1 | | 0 | | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20.0 | 0,1 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21.0 | 0 | | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22.0 | 0 | | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23.0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24.0 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25.0 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

File Name Convention: SWWYYYYR where WW corresponds to the wind speed, Uw; YYYY corresponds to the yaw angle (M030=-30); R corresponds to the repetition digit. Each entry in the above table represents the repetition digit of the filename corresponding to that wind speed and yaw angle. Two additional files representing 6-minute duration, 360° yaw sweeps at 7 and 10 m/s respectively are S07YSU00 and S10YSU00.



Экспериментальные данные NREL

NREL Phase VI Rotor - (sequence, S)



| 1-Wind speed(mean) | 2-Torque(mean) | 3-Torque (Maximum) | 4-Torque(Minimum) | 5-Stand.Dev. for Torque | 6-Stand. Dev. for Wind Speed | 7- Turb intensity(%) |
|--------------------|----------------|--------------------|-------------------|-------------------------|------------------------------|----------------------|
| 5.0385 | 293.0773 | 432.9061 | 104.4467 | 51.4834 | 0.1641 | 3.2569 |
| 7.0163 | 801.2650 | 1044.7220 | 583.7277 | 71.4674 | 0.1181 | 1.6832 |
| 9.0133 | 1374.5872 | 1571.9269 | 1131.9087 | 71.1623 | 0.0946 | 1.0496 |
| 10.0471 | 1341.1021 | 1543.4984 | 1084.6403 | 72.9948 | 0.0826 | 0.8221 |
| 11.0388 | 1323.1683 | 1649.6383 | 1030.2158 | 87.6305 | 0.0781 | 0.7075 |
| 13.0695 | 1308.6212 | 1523.1484 | 1054.5311 | 75.3614 | 0.0665 | 0.5088 |
| 15.0982 | 1172.0354 | 1510.9124 | 818.3629 | 94.7514 | 0.0617 | 0.4087 |
| 17.1147 | 1057.5577 | 1270.2898 | 734.6348 | 76.5153 | 0.0586 | 0.3424 |
| 20.1309 | 1109.6128 | 1339.0066 | 841.6244 | 74.8159 | 0.0533 | 0.2648 |
| 25.1088 | 1489.7145 | 1760.1257 | 1215.6735 | 81.7590 | 0.0534 | 0.2127 |

*Turbulent intensity is computed by

Turb Intensity (I)=

$$I \equiv \frac{u'}{U} \times 100\%$$

Where:

u' = Stadnd. Dev. For Wind speed

\bar{U} = mean value of Wind speed

<p.S> Stand. Dev= Standard deviation

Измерения параметров в испытаниях

□ Измеряются **полное и статическое давление и температура** на входе в трубу, **полное и статическое давление** в области испытаний, а затем рассчитываются **полное давление, скорость ветра, плотность и температуру воздуха** в каждом испытании (например, для серии S05000000~S25000000)

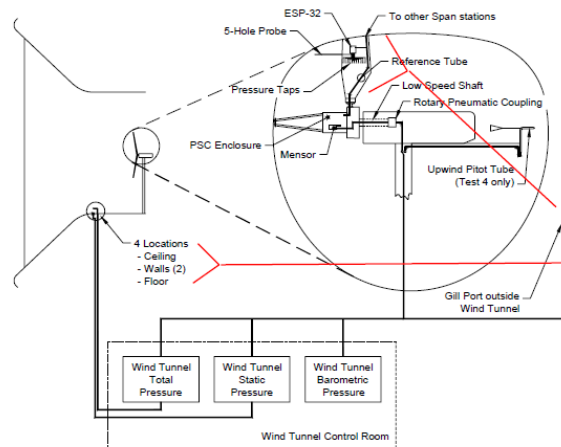
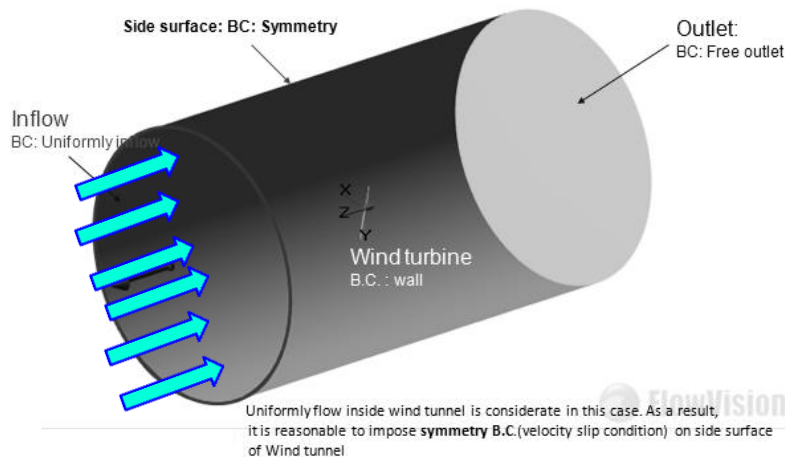


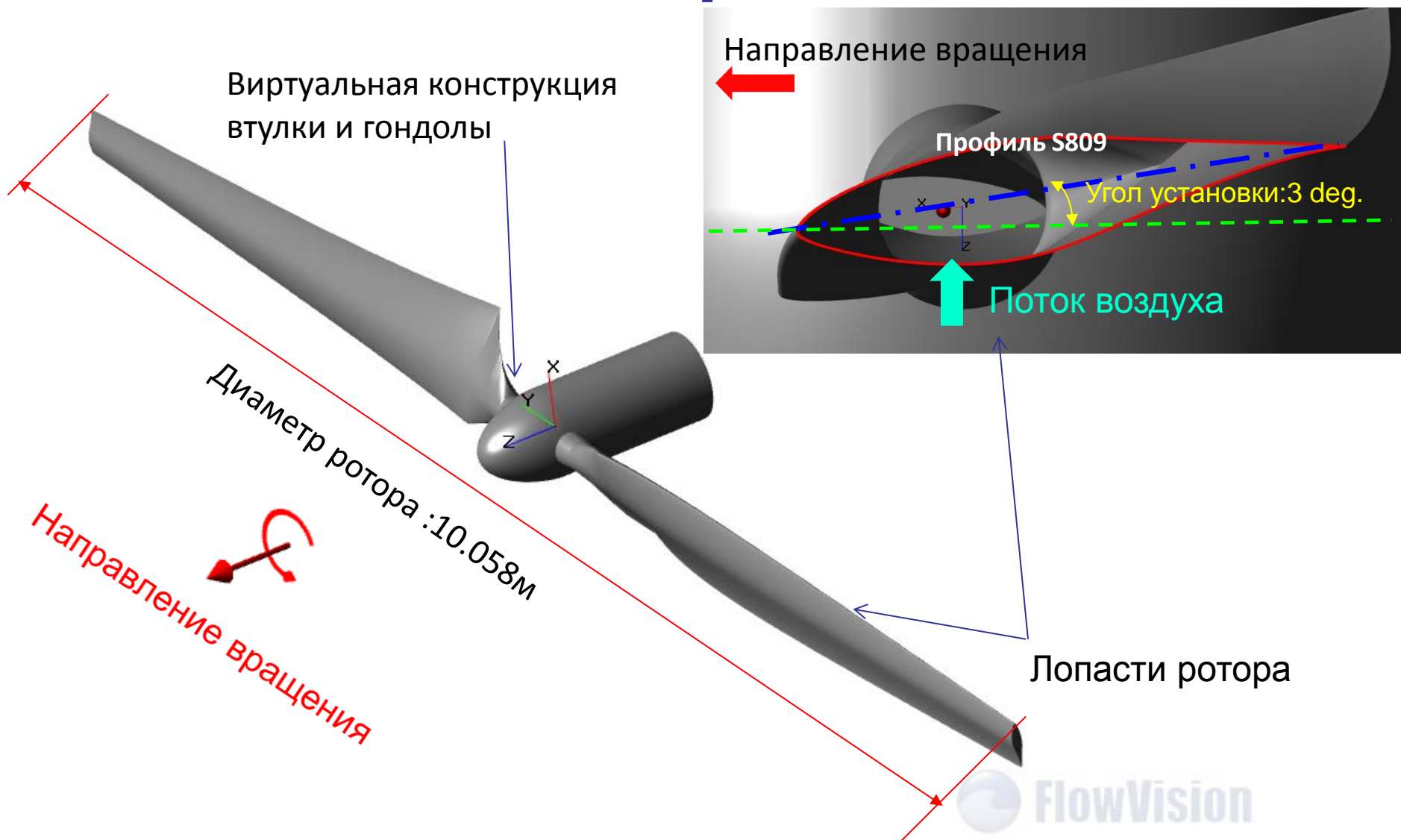
Figure 11. Wind tunnel and wind turbine pressure system diagram (not to scale)

| 8-Test No. | 9-RPM (mean) | 10-Velocity(mean) | 11- Turb intensity(%) | 12-Air density (mean) | 13-Wind tunnel temp(mean) | 14-Wind Tunnel Total pressure(mean) | 15- Viscosity@37.2796 C |
|----------------|--------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| 1 S05000000 | 71.6851 | 5.0385 | 3.2569 | 1.2435 | 37.2796 | 101946.2734 | 1.9214e-5 |
| 2 S07000000 | 71.8667 | 7.0163 | 1.6832 | 1.2458 | 37.2796 | 101464.5781 | 1.9214e-5 |
| 3 S09000000 | 72.0981 | 9.0133 | 1.0496 | 1.2457 | 37.2796 | 101988.4844 | 1.9214e-5 |
| 4 S10000000 | 72.0962 | 10.0471 | 0.8221 | 1.2459 | 37.2796 | 101957.7109 | 1.9214e-5 |
| 5 S11000000 | 72.0988 | 11.0388 | 0.7075 | 1.2285 | 37.2796 | 101571.1953 | 1.9214e-5 |
| 6 S13000000 | 72.0940 | 13.0695 | 0.5088 | 1.2266 | 37.2796 | 101515.1328 | 1.9214e-5 |
| 7 S15000000 | 72.0619 | 15.0982 | 0.4087 | 1.2240 | 37.2796 | 101505.5313 | 1.9214e-5 |
| 8 S17000000 | 72.0071 | 17.1147 | 0.3424 | 1.2230 | 37.2796 | 101464.5781 | 1.9214e-5 |
| 9 S20000000 | 72.0088 | 20.1309 | 0.2648 | 1.2214 | 37.2796 | 101451.7656 | 1.9214e-5 |
| 10 S25000000 | 72.1622 | 25.1088 | 0.2127 | 1.2197 | 37.2796 | 101410.6484 | 1.9214e-5 |
| 11 Stand. Dev. | <0.008 RPM | <0.1m/s | | <<0.003 Kg/m^3 | <<0.0271 C | <260 Pa | |

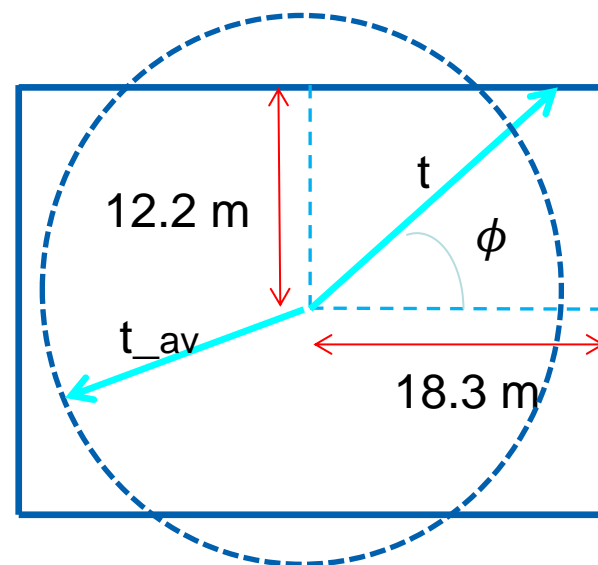
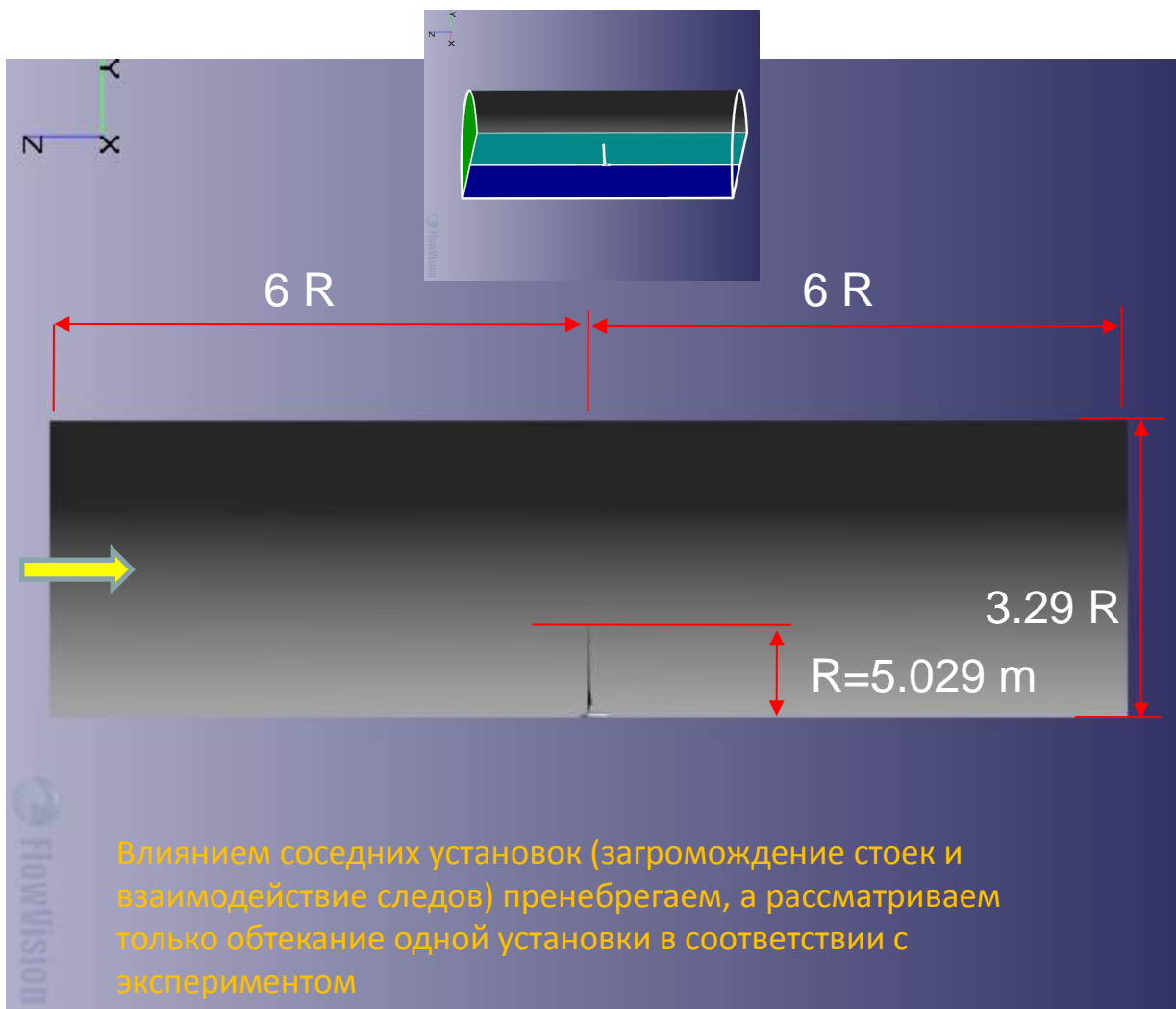
Молярный вес сухого воздуха $M = 0.0289644$ кг/моль

*Description: s05XXXXXX , S: test sequence , 05= wind speed, XXXXXX is the definition for Yaw condition . All of the Yaw angle equal to "0" deg for present cases,

Полноразмерная геометрия ротора для моделирования



Расчетная область (половина цилиндра)



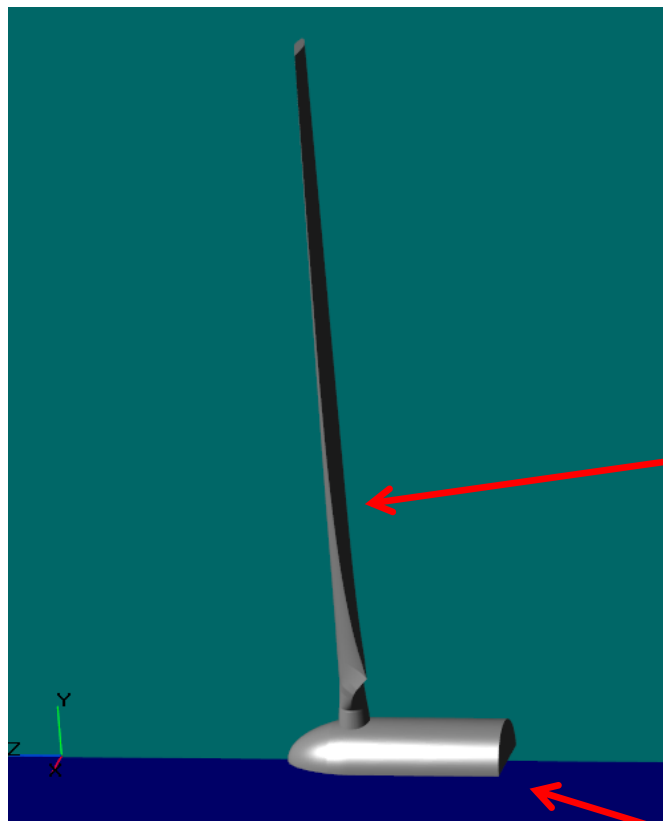
Замена прямоугольной аэродинамической трубы цилиндром

$$t_{av} = \frac{\int_0^{\pi/2} t(\phi) d\phi}{\pi/2} = 3.29R$$

Для сравнения:

$$t_{square\ av} = 3.35R$$

Сборка половины ротора



Встраивается как подвижное тело

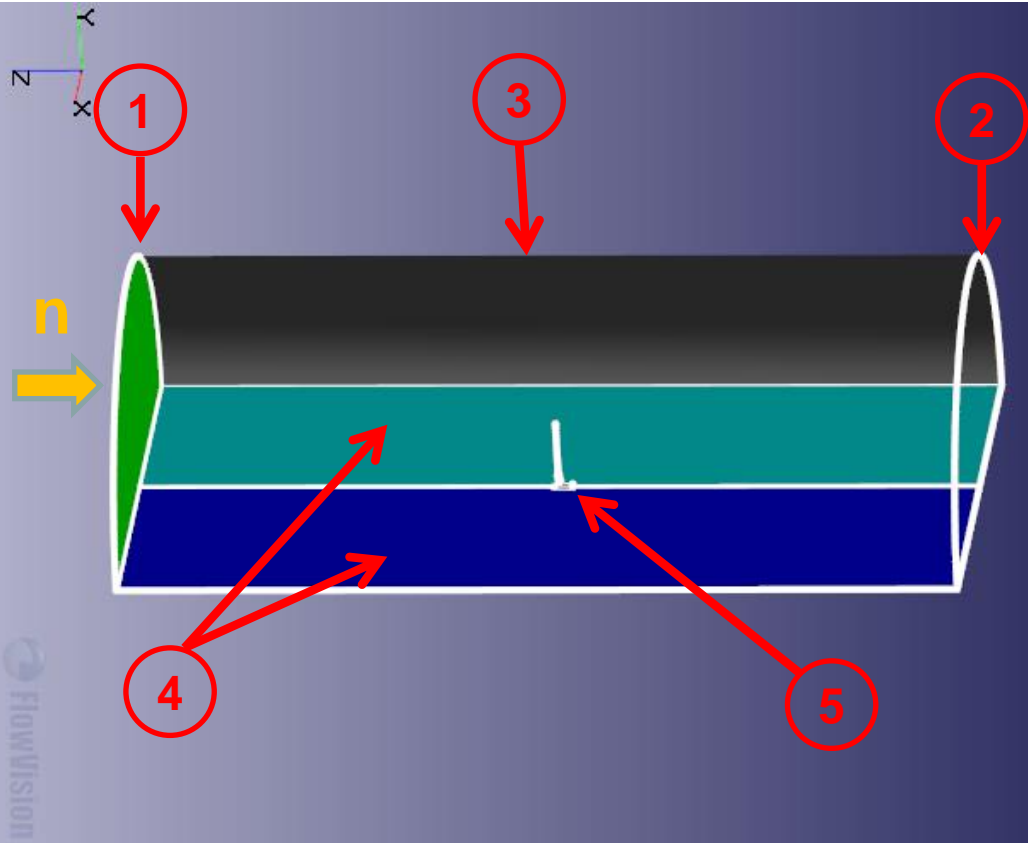
На плоскости симметрии
выделяется как
отдельная поверхность

Постановка задачи: уравнения и допущения

- Уравнения Навье-Стокса для течений несжимаемого воздуха;
- k - ϵ AKN модель турбулентности для низких чисел Рейнольдса (Abe, K., Kondoh, T., Nagano, Y. (1995)); на входе задаем малое значение вихревой вязкости;
- Стенки ротора адиабатические (лопасть и гондола);
- Вся расчетная область вращается вместе с ротором;
- -----
- Высокопроизводительные параллельные вычисления на основе MPI технологии



Граничные условия



- 1 Вход:**

 - n – направление скорости
 - ρV – однородный поток массы
 - ρ – плотность, μ – вязкость
 - Tu, L – интенсивность, масштаб турбулентности
- 2 Выход:**

 - $p = \text{const}$ – статическое давление
 - $n \frac{\partial k}{\partial r} = 0, n \frac{\partial \epsilon}{\partial r} = 0$
- 3 Боковая поверхность: проскальзывание**

 - $V n = 0$ (n – normal)
 - $n \frac{\partial k}{\partial r} = 0, n \frac{\partial \epsilon}{\partial r} = 0$
- 4 Плоскость симметрии:**

 - Вращательная периодичность ($\phi_1 = \phi_2$)
- 5 Лопать ротора и гондола: стенка:**

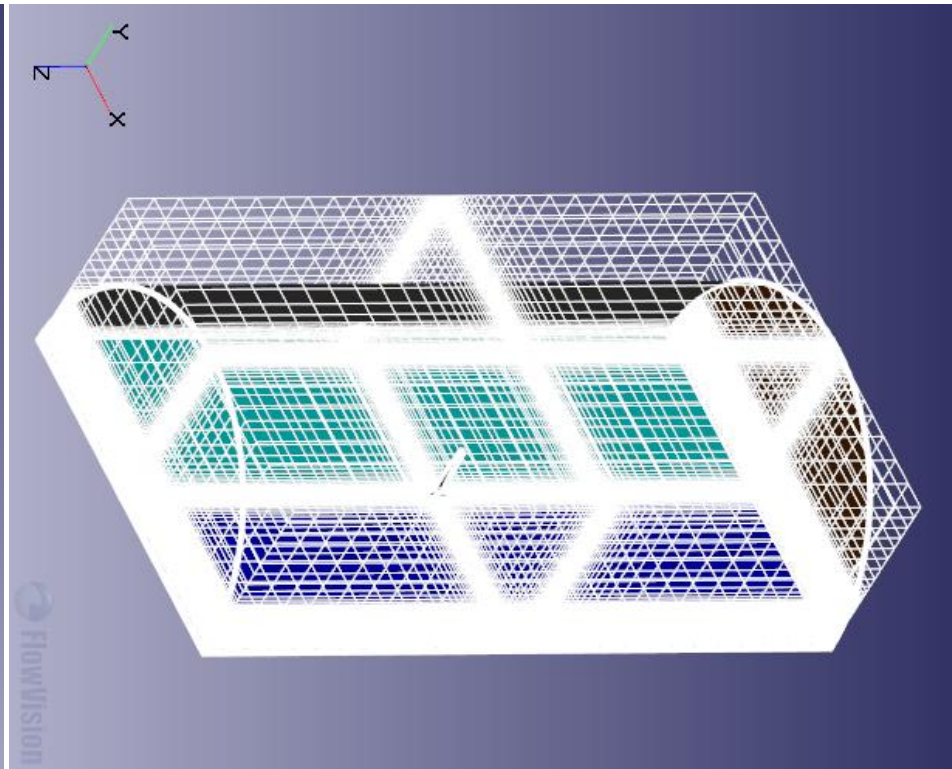
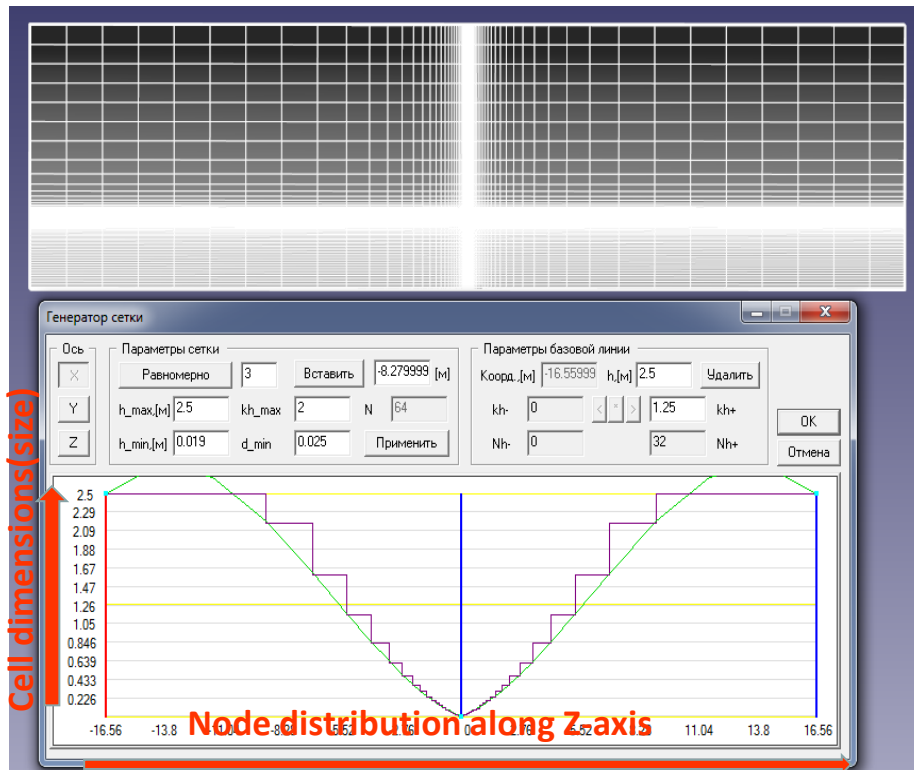
 - Условия прилипания (пристеночные функции)
 - условия для k и ϵ для пристеночных функций

Построение сетки: начальная сетка

В общем, построение сетки состоит из двух шагов:

Шаг 1 – построение начальной сетки (в препроцессоре);

Шаг 2 – дальнейшее измельчение сетки (в процессе вычислений)



Начальная сетка генерируется встроенным сеткопостроителем

Начальная сетка (вид снизу)

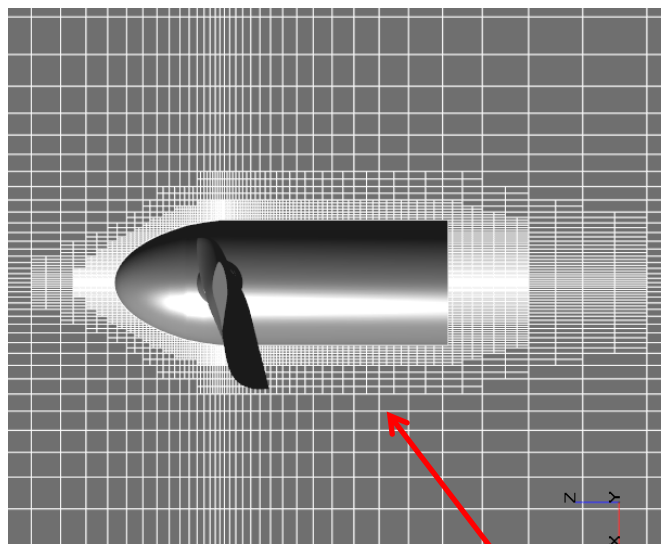
Построение сетки: дальнейшее измельчение

Дальнейшее измельчение ('адаптация сетки'):

- Адаптация на граничных поверхностях

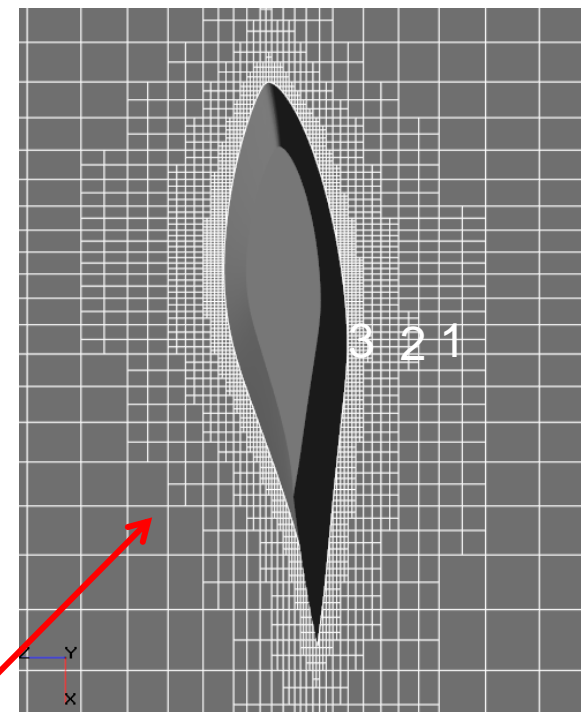
Особенности процесса при адаптации:

- Автоматическое измельчение (управление одними параметрами);
- Измельчение может быть выполнено пошагово (постепенно) в процессе вычислений

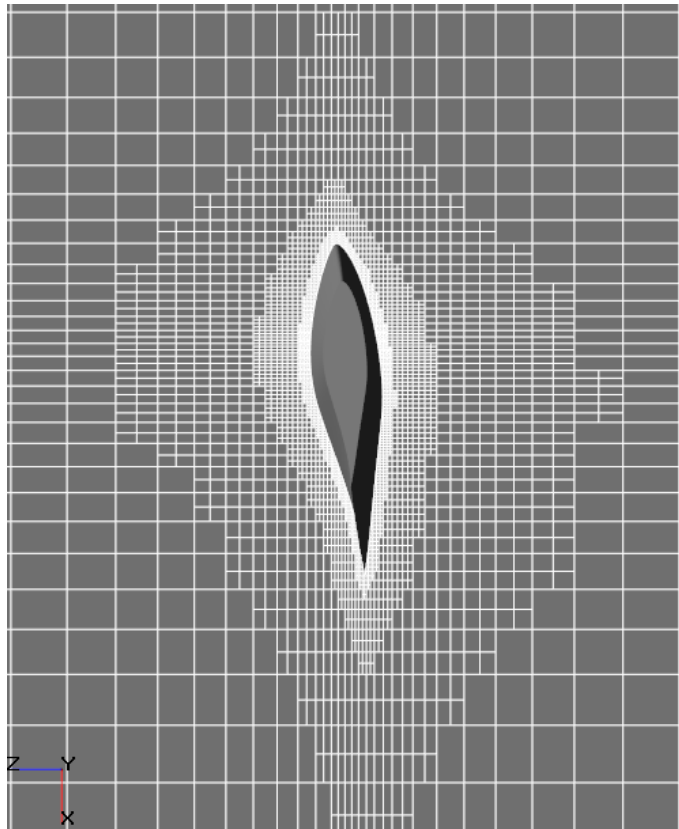


Окончательная сетка:

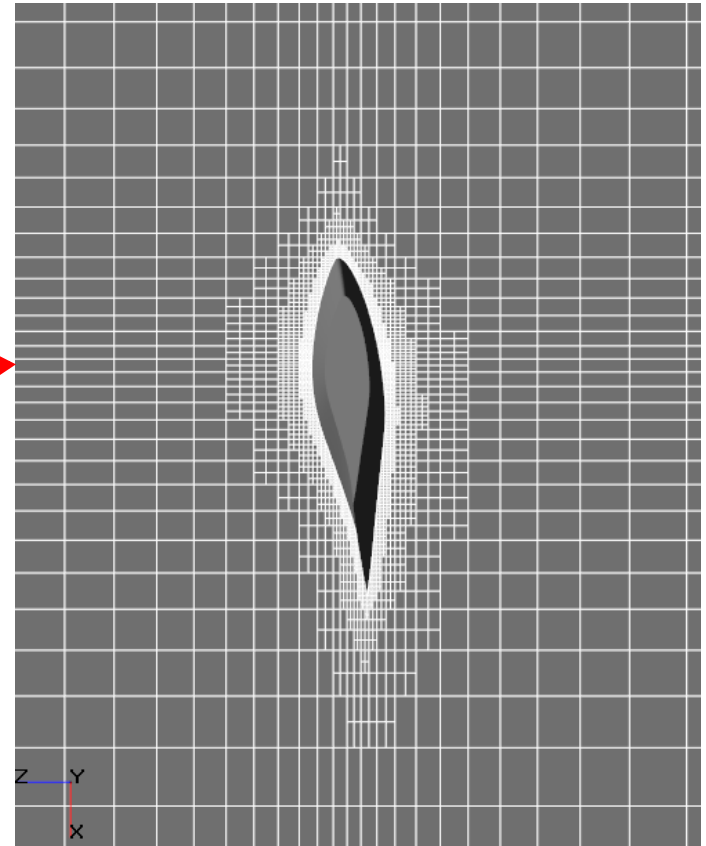
- 2 ой уровень адаптации на гондоле
- 3 ий уровень адаптации на лопасти



Качество сетки: результаты на сетках с различным количеством ячеек на уровнях адаптации сетки



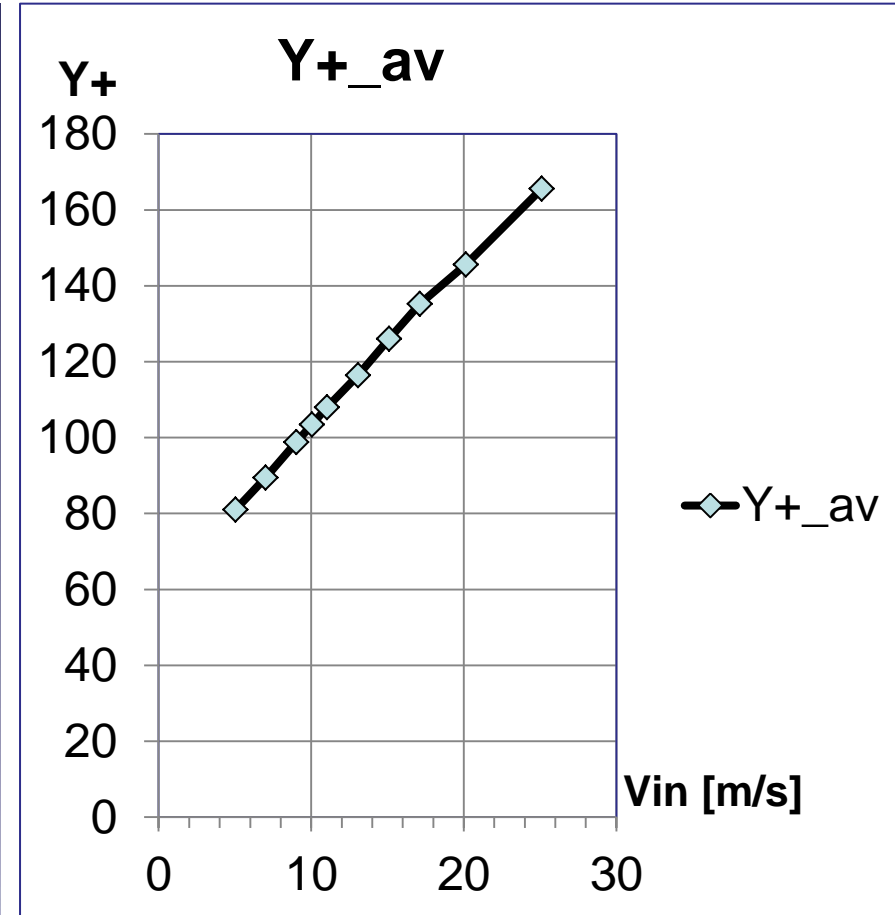
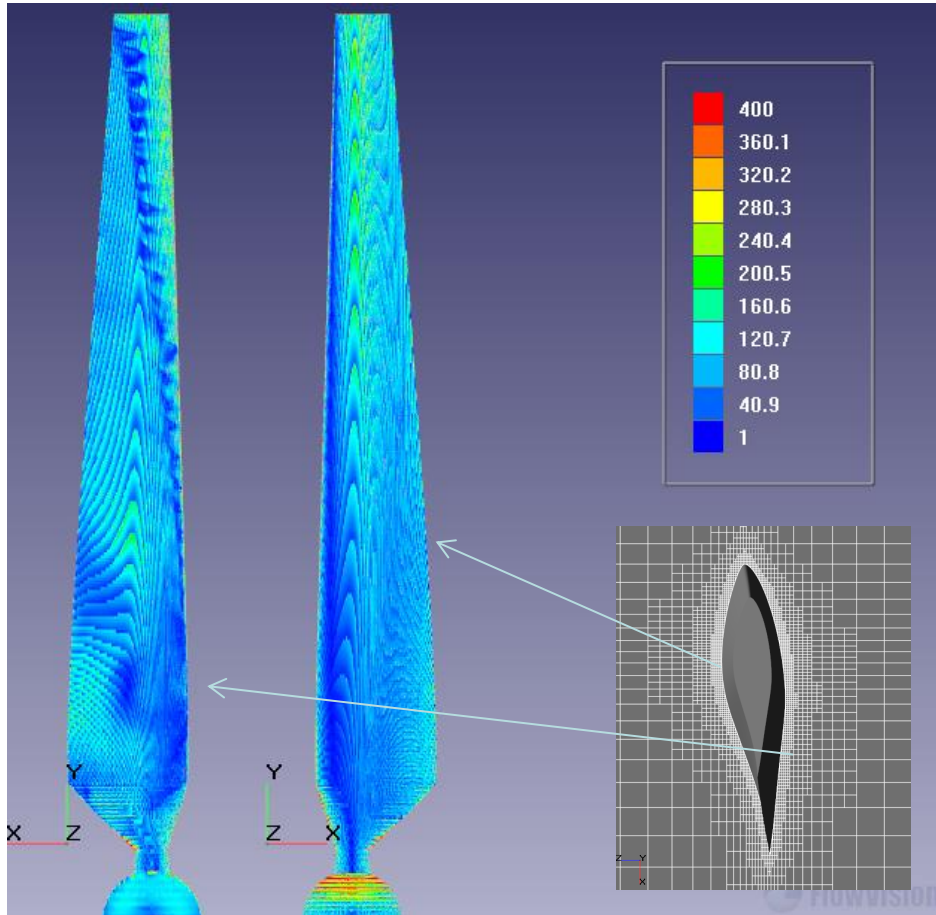
Сечение сетки: уровень: 1 - 2 - 3
ячейки : 14-10-5



Сечение сетки: уровень: 1 - 2 - 3
ячейки : 7 - 7 - 5

Различие в уровнях вращающего момента на этих сетках при $V_{in}=13\text{м/с}$ составил $\Delta Mz=3\%$. В дальнейших расчетах была использована сетка с меньшим числом ячеек

Качество сетки: значения Y^+

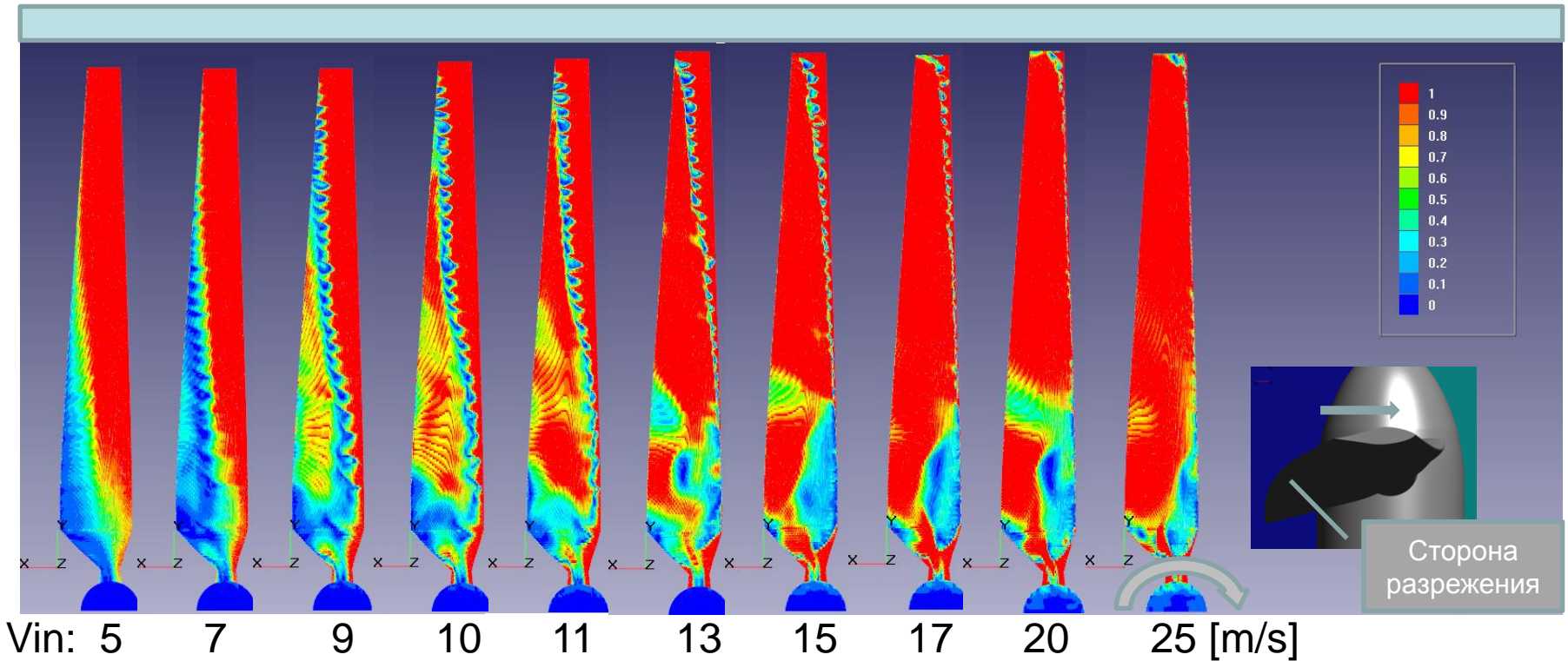


Средние значения Y^+ на лопастях
(пристеночные функции: приближение FlowVision)

Y^+ на поверхности ротора при $V_{in}=13$ м/с

Результаты: динамика линии отрыва на спинке

Линия отрыва постепенно смещается вверх по потоку с увеличением скорости набегающего потока

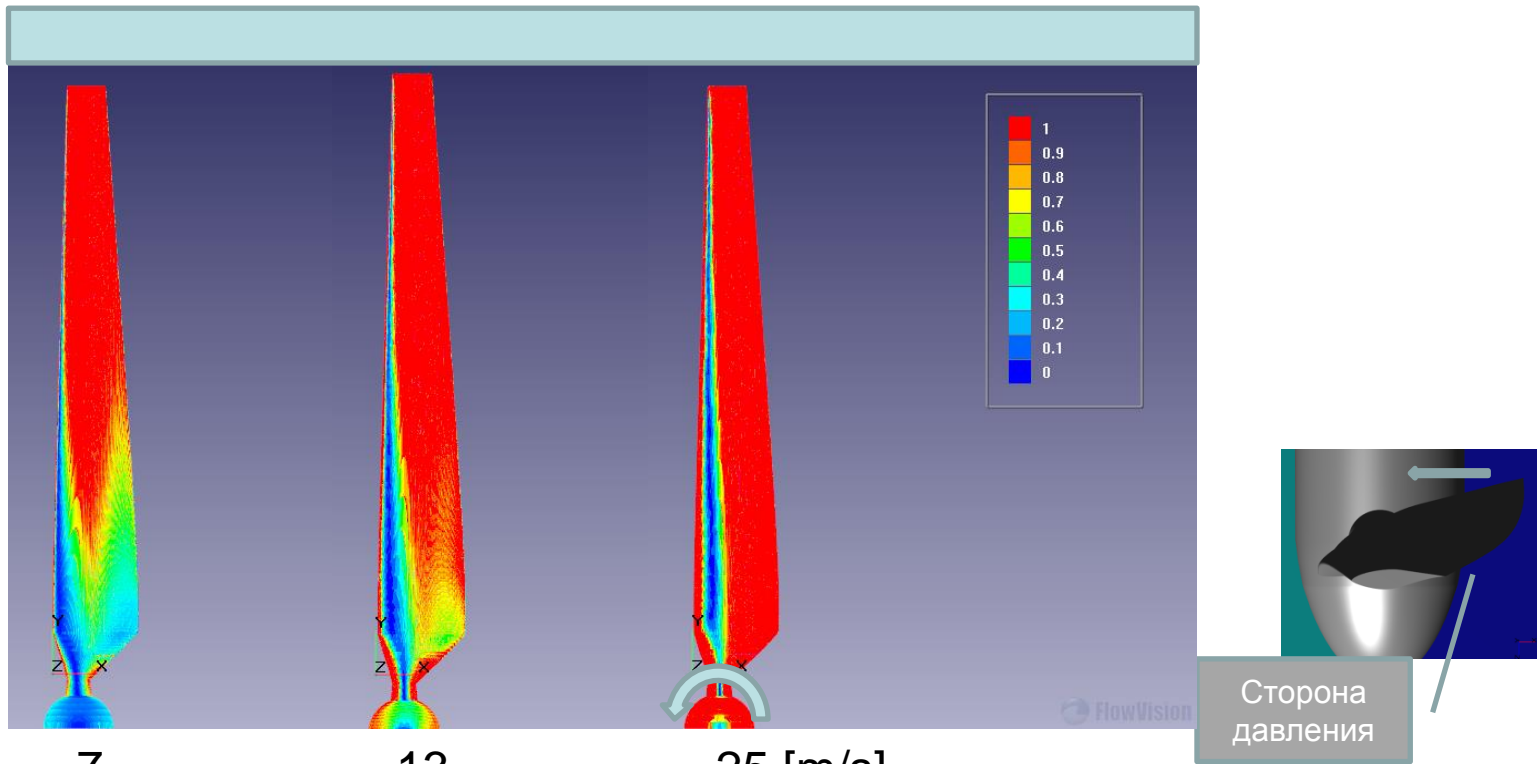


Распределение напряжения сдвига на стороне разрезания
(максимум ограничен 1, чтобы выделить линию отрыва)



Результаты: динамика линии торможения потока на корытце

Линия торможения смещается вследствие увеличения угла атаки



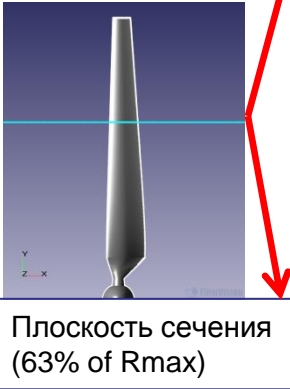
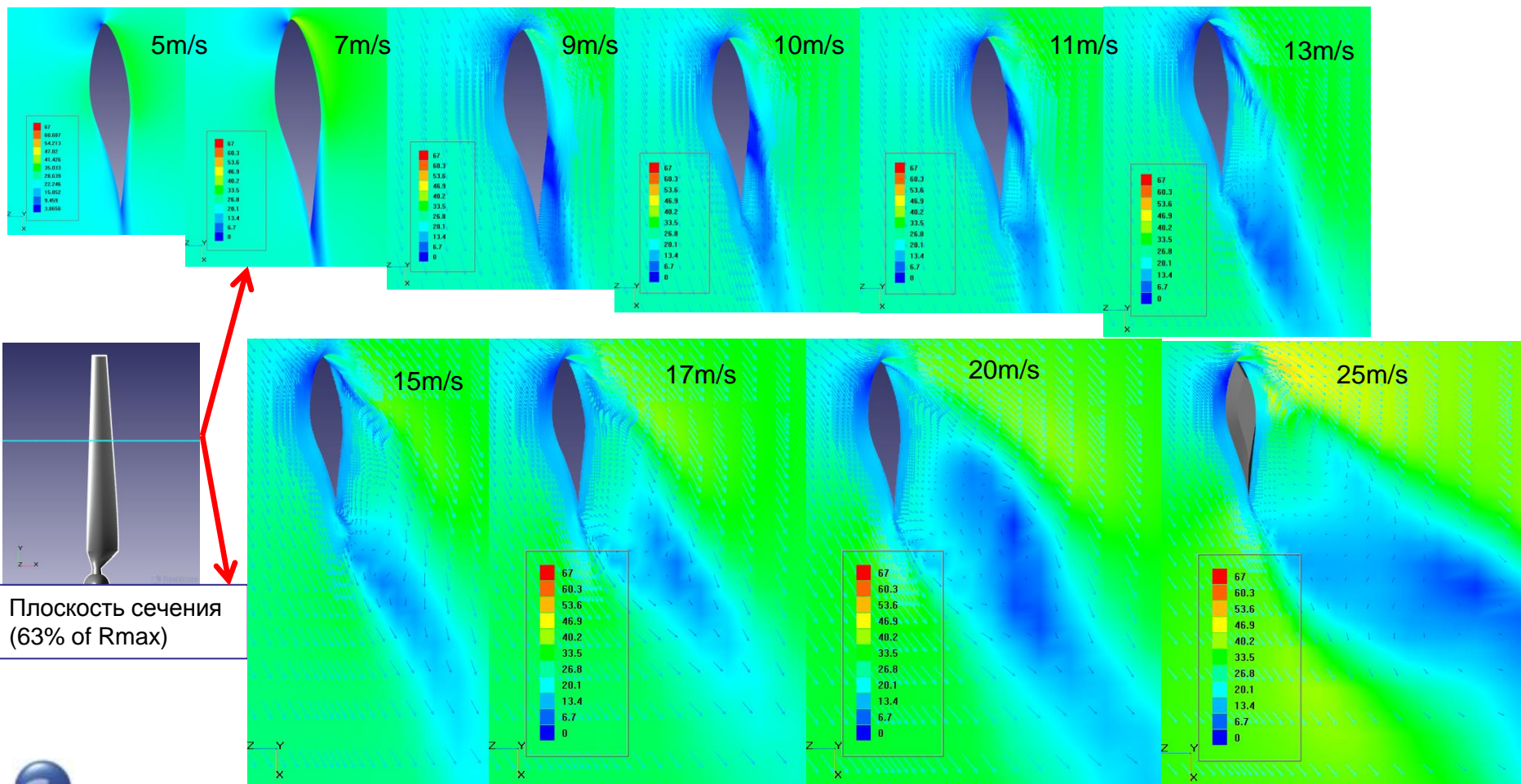
Vin: 7 13 25 [m/s]

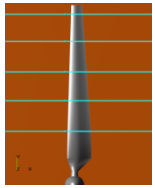
Распределение напряжения сдвига на стороне давления



Результаты: Возникновение и развитие отрывного пузыря на спинке с увеличением скорости ветра

Мгновенные распределения относительной скорости в плоскости сечения лопасти (63%Rmax)





Результаты: коэффициент давления в 5 сечениях лопасти для $V_{in}=7\text{ м/с}, 13\text{ м/с}$

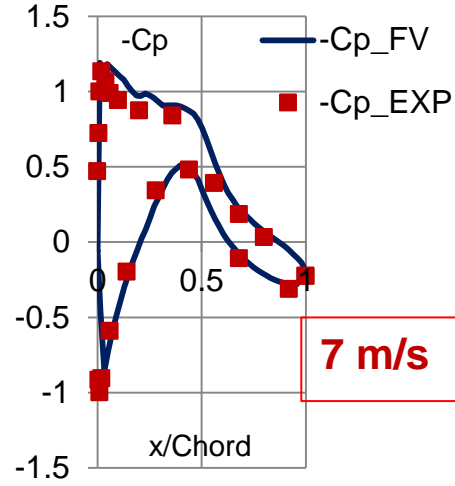
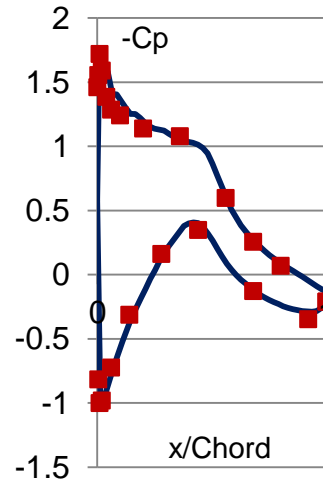
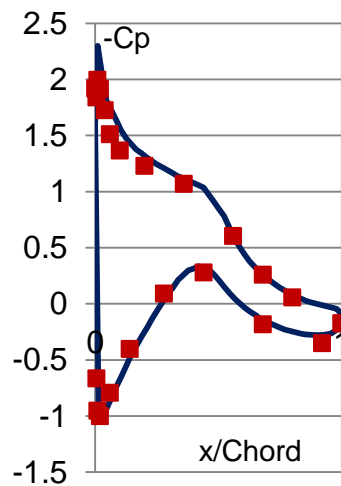
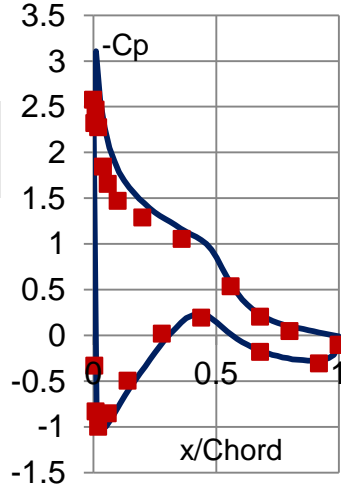
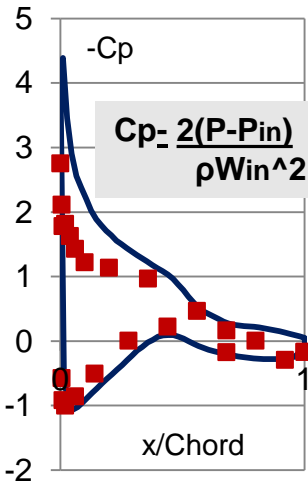
$r/R=0.30$

$r/R=0.47$

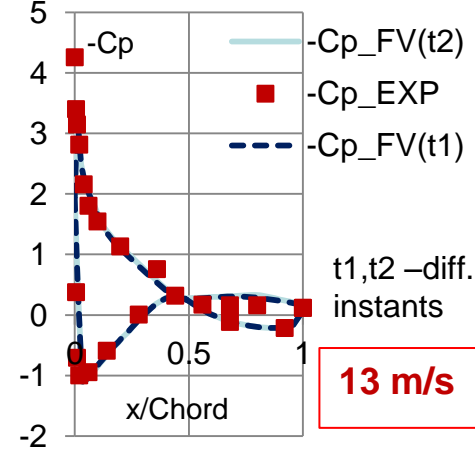
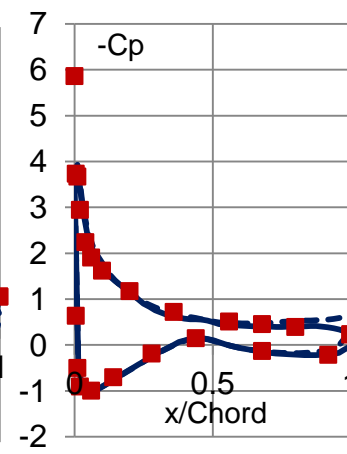
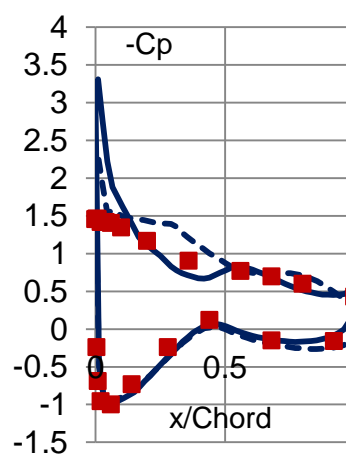
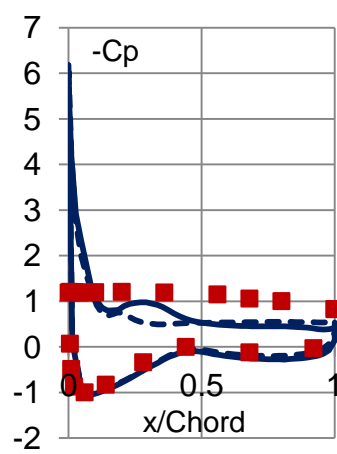
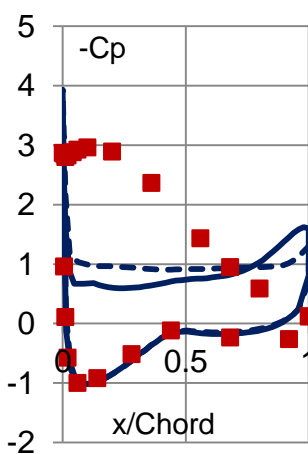
$r/R=0.63$

$r/R=0.80$

$r/R=0.95$



7 m/s

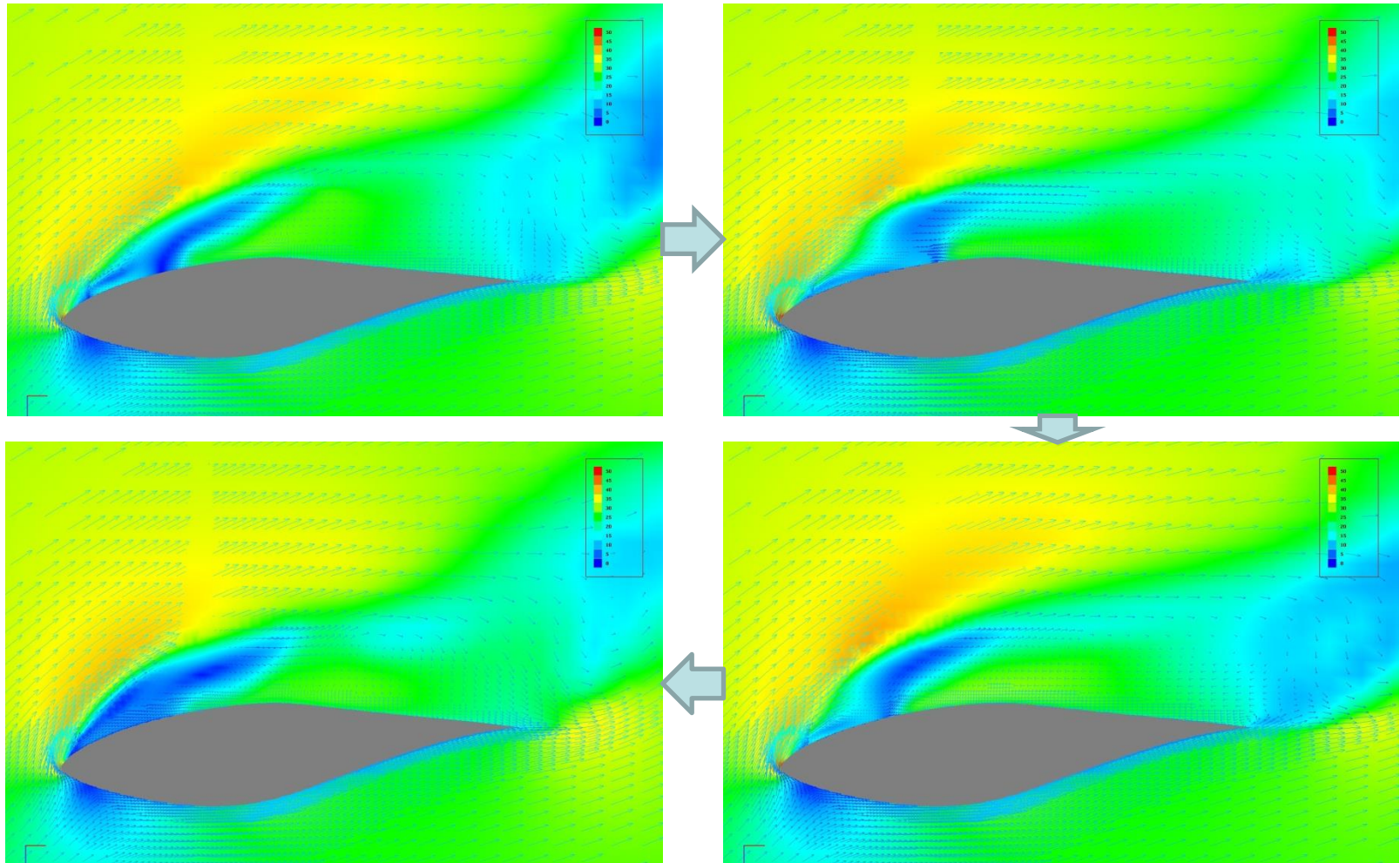


13 m/s

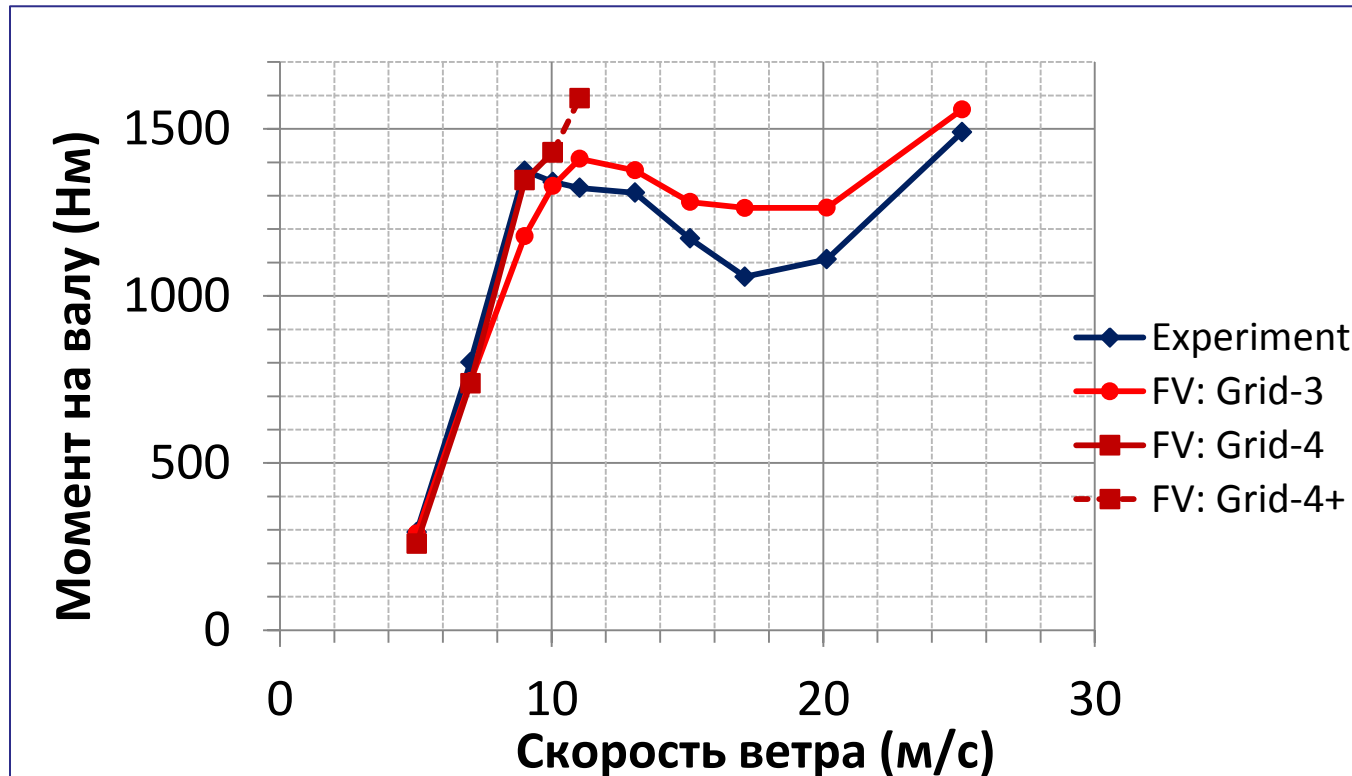
- Большие отклонения в C_p для нижней части лопасти можно приписать грубости сетки для этой части лопасти
- В расчетах с $V_{in}=13\text{ м/с}$ для отрывных зон наблюдается нестационарность потока

Нестационарность отрывных зон (в расчетах)

Мгновенные распределения относительной скорости в плоскости 63% от Rmax в
различные моменты времени

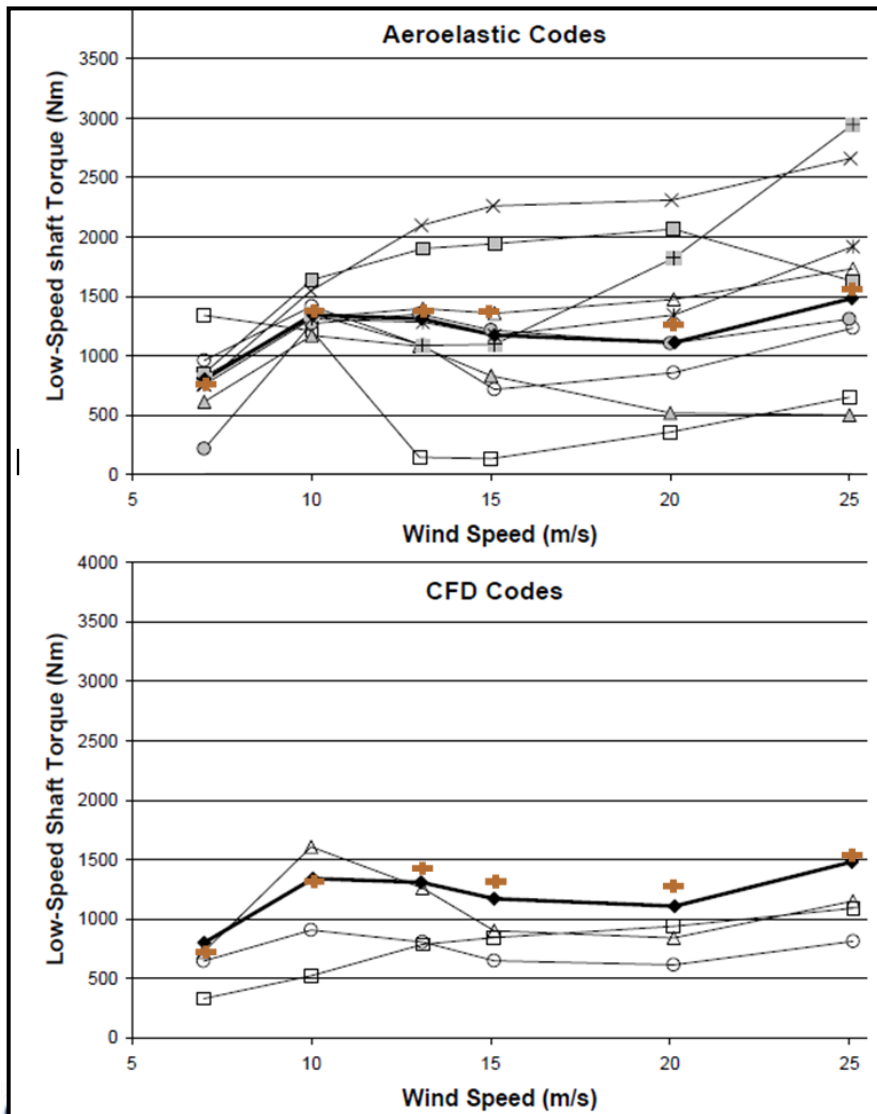


Сопоставление моментов вращения сил, действующих на ротор



- В целом результаты на сетке с 3 уровнями адаптации удовлетворительно следуют эксперименту ($\Delta_{\max}=18\%$)
- Результаты на сетке с 4 уровнями адаптации лучше описывают эксперимент для безотрывных режимов (5m/s – 9 m/s)
- Использование FlowVision на сетках с $Y^+ < 100$ (4 уровня адаптации) для потоков с протяженным отрывом ведет к результатам, значительно отличающимся от эксперимента (предположительно из-за ограничений метода пристеночными функциями + сложная физика в пограничных слоях)

FlowVision в сравнении с программами, использованными NREL в слепом тестировании



Момент на валу, против потока, угол рыскания 0°

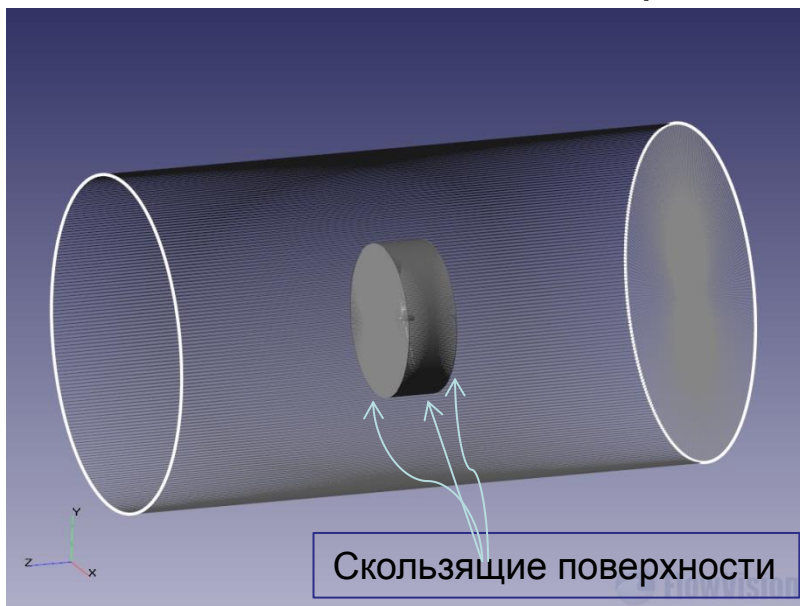
+ - FlowVision

◆ - Эксперимент

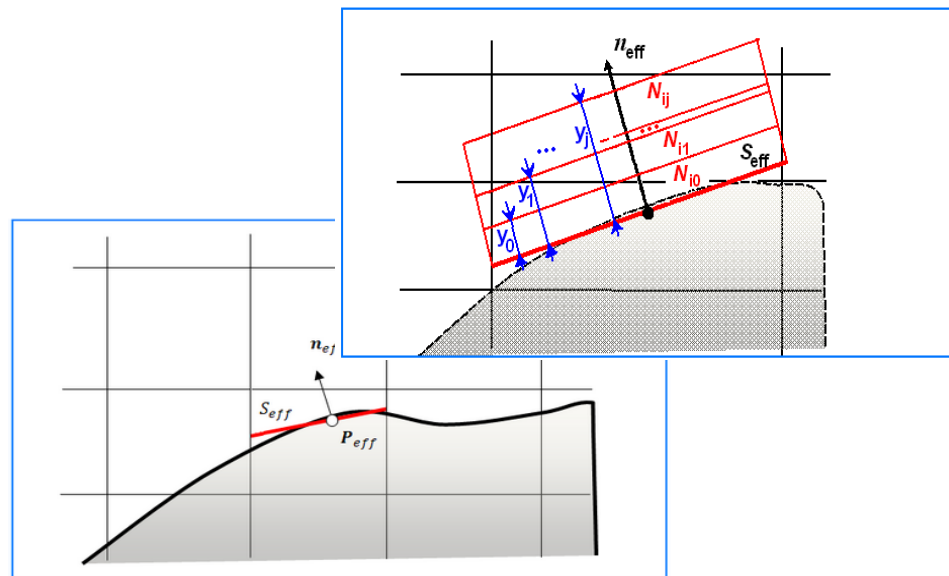
Другие символы – данные, собранные NREL для слепого тестирования CFD-кодов

Другие возможности FlowVision 3.09 для решения задачи

Технология скользящих поверхностей Технология приповерхностных сеток (OBL)



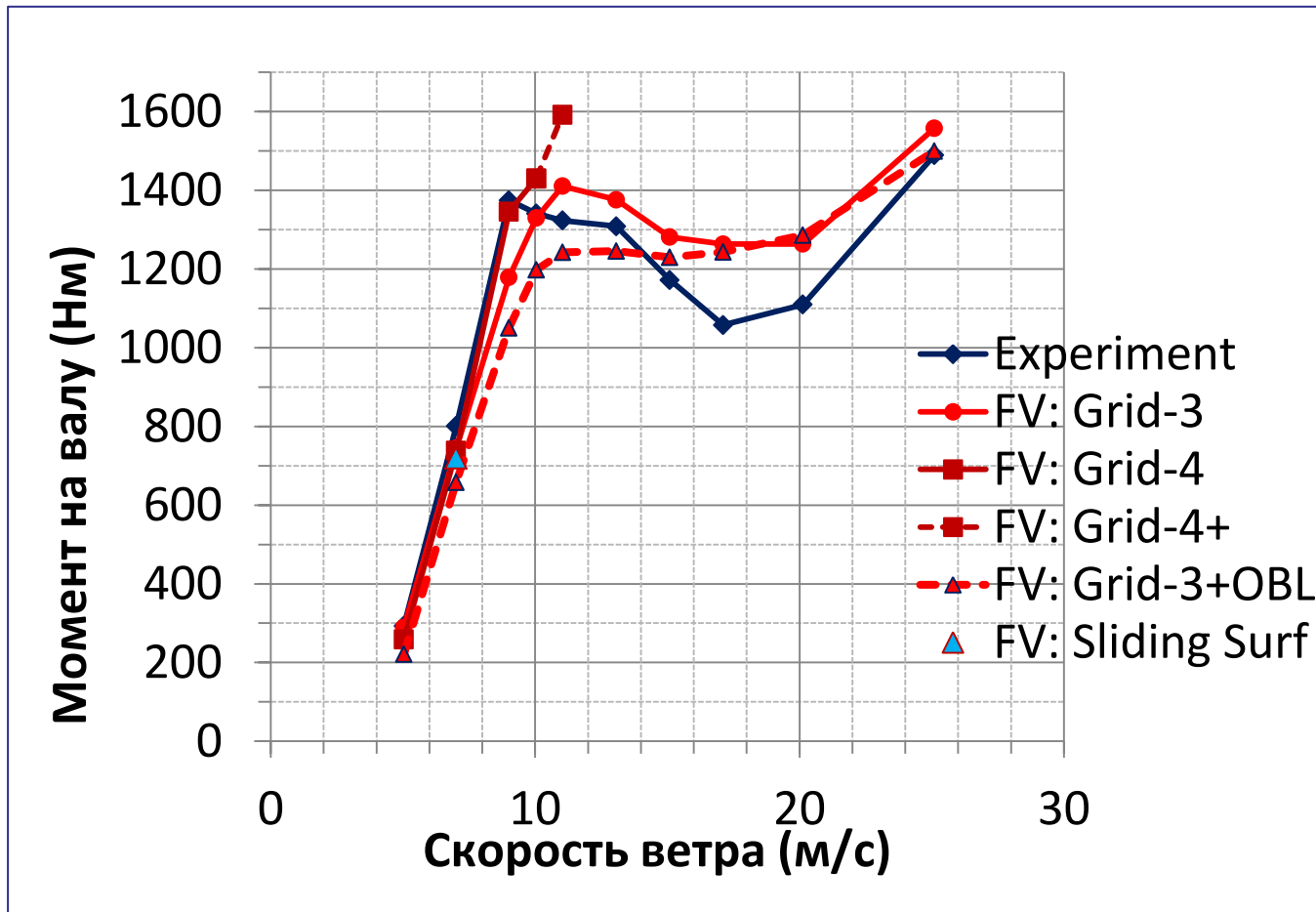
- Выбирается осесимметричная под-область с ротором внутри
- Подобласть и ротор вращаются вместе
- Остальная часть области неподвижна
- Граничные условия не меняются
- **Технология позволяет рассчитывать течения с ненулевым углом рыскания**



- Строится дополнительная приповерхностная сетка
- Для двух разных сеток уравнения решаются отдельно
- Граничные условия для внешней части OBL-сетки берутся из решения на основной сетке
- На стенке между областями с различной сеткой осуществляется обмен (величина Δ поток величины)



Сводные результаты



Технологии OBL-сеток и скользящих поверхностей воспроизводят измерения с такой же точностью, что и базовый метод. Поэтому они также могут применяться для решения подобного рода задач

Заключительные замечания

- Решена задача о течении в ветроэнергетической установке с использованием программного комплекса FlowVision 3.09. Получено удовлетворительное для инженерной практики совпадение расчетных и экспериментальных данных.
- Показано, что FlowVision 3.09 является эффективным инструментом для анализа работы ветроэнергетических установок. Расчет одного варианта на сетке с 1.4 млн. ячеек занимает около 1-2 суток (физическое время) на персональном компьютере с одним 4-х ядерным процессором с частотой 3.6 ГГц и требует 5.3 ГБ оперативной памяти. Оперативность программы делает расчеты доступными в процессе проектирования установок.
- Для получения удовлетворительного решения задачи необходимо, чтобы расчетная сетка удовлетворяла 2-м условиям:
 - (1) воспроизведение распределения давления должно быть достаточно хорошим;
 - (2) среднее значение Y^+_{av} на лопасти ротора должно быть ограничено пределами $Y^+ = 80-200$ ($Y^+ = 100-200$ – для отрывных режимов)



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

