

UiT

THE ARCTIC
UNIVERSITY
OF NORWAY

Работа ветряных установок в условиях обледенения

Мухаммад Вирк

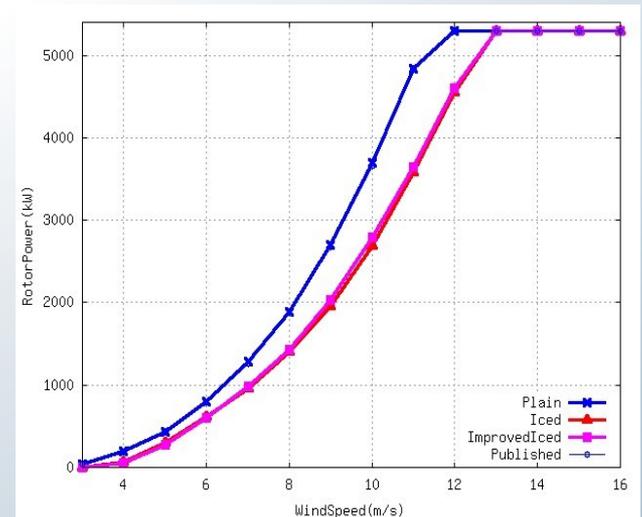
Семинар проекта
«Северная ось —
Баренц Линк»
21 сентября 2021



Photo: Jo Jørem Aarseth

Введение

- В холодных регионах богатые ветровые ресурсы, но атмосферное обледенение - одно из главных препятствий для их эффективного использования, поскольку обледенение ветряных турбин влияет на их производительность и, в результате, на годовую выработку энергии.
- Атмосферное обледенение ветровых турбин в основном происходит из-за столкновения переохлажденных капель воды с открытыми частями ветряной турбины и их замерзания.
- Конструкция / производительность / эксплуатация ветряных турбин в холодных регионах зависит от льда, *нарушающего аэродинамику лопастей, усиливающего усталость и разрушение конструкции из-за дисбаланса массы и повреждений или нарушений, вызванных возможным неконтролируемым выпадением кусков льда из ветряных турбин.*
- Необходимо лучшее понимание физики атмосферного обледенения и его последствий, для улучшения конструкции и безопасности работы ветряных турбин в условиях обледенения.
- Международное энергетическое агентство (МЭА) Приложение 19: *“Ветровая энергия в холодных климатических районах”* также призывает к разработке новых методов для улучшения прогнозирования влияния нарастания льда на производительность ветряных турбин и выработку энергии.



(Пример атмосферного обледенения ветряных турбин в холодных регионах)

[1]-Maissan, T.M., *The Effects of the Black Blades on Surface Temperatures for Wind Turbines*, in W.A.T. J., Editor 2001, Université du Québec à Rimouski: Canada

[2]- <http://www.eolos.umn.edu/research>

Последствия обледенения ветряных турбин

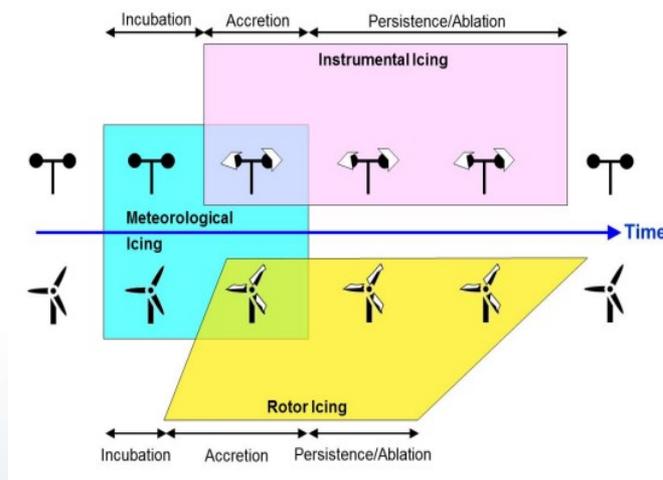
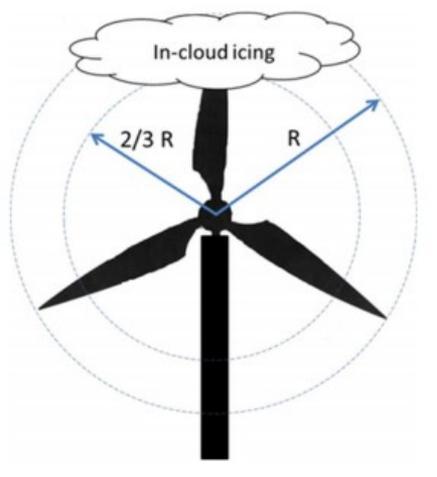
- ❑ Основные последствия атмосферного обледенения ветряных турбин:
 - Нарушение аэродинамики лопастей.
 - Усиление усталости/разрушение конструкции из-за дисбаланса массы.
 - Вред для человека из-за выпадения кусков льда.
 - Ошибки в показаниях измерительных приборов.
 - Потери выработки энергии.
 - Полное прекращение выработки энергии.

Оценка ветровых ресурсов и обледенения

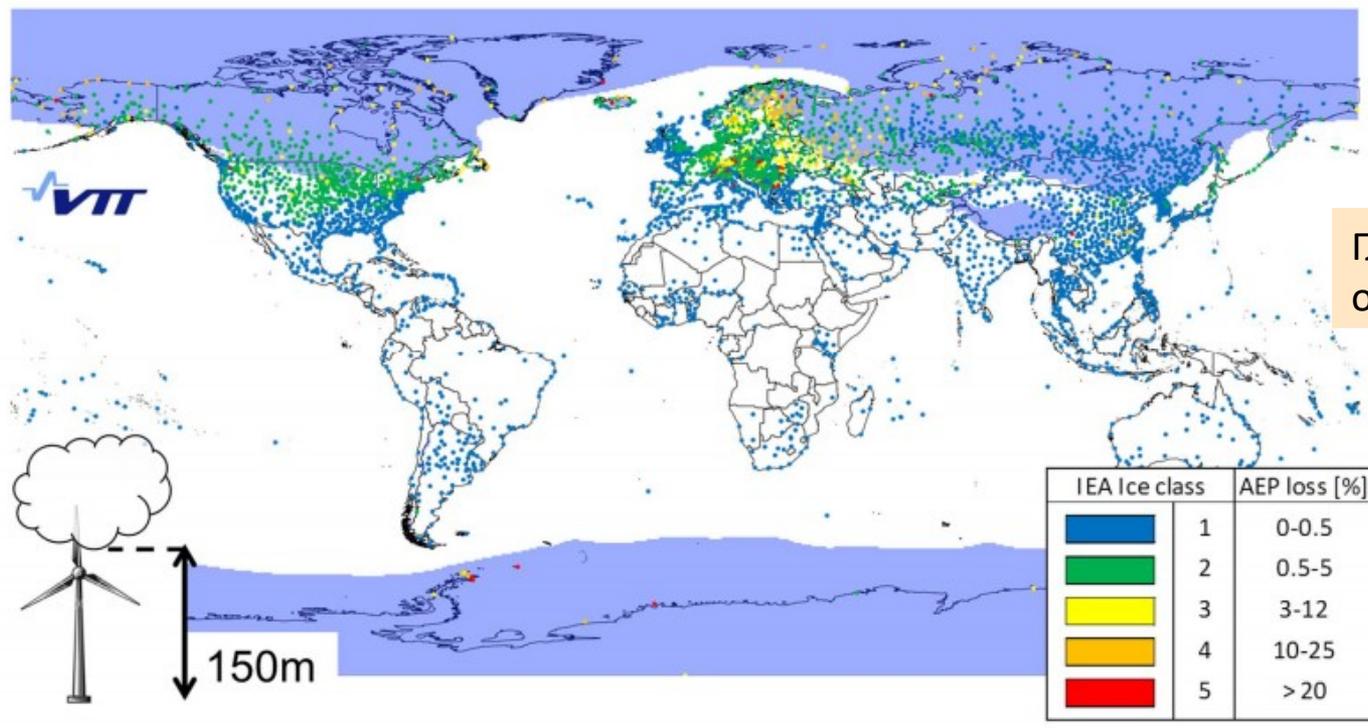


-
- ❑ Оценка ветровых ресурсов в холодных регионах, для которых свойственно обледенение, важна как для работы ветропарков, так и для обеспечения более точного прогноза выработки энергии ветра. Но это сложно.....!
 - ❑ Оценка ветровых ресурсов обычно производится на этапе планирования ветропарка, когда детальный анализ производится с использованием метеомачты и инструментов мезомасштабного моделирования.
 - ❑ Низкие температуры и обледенение создают дополнительные трудности для оценки ветровых ресурсов в холодных регионах.
 - ❑ Карты ледовой нагрузки обычно разрабатываются на этапе планирования/концептуального проектирования для получения оценки случаев обледенения и вероятной нагрузки от обледенения.

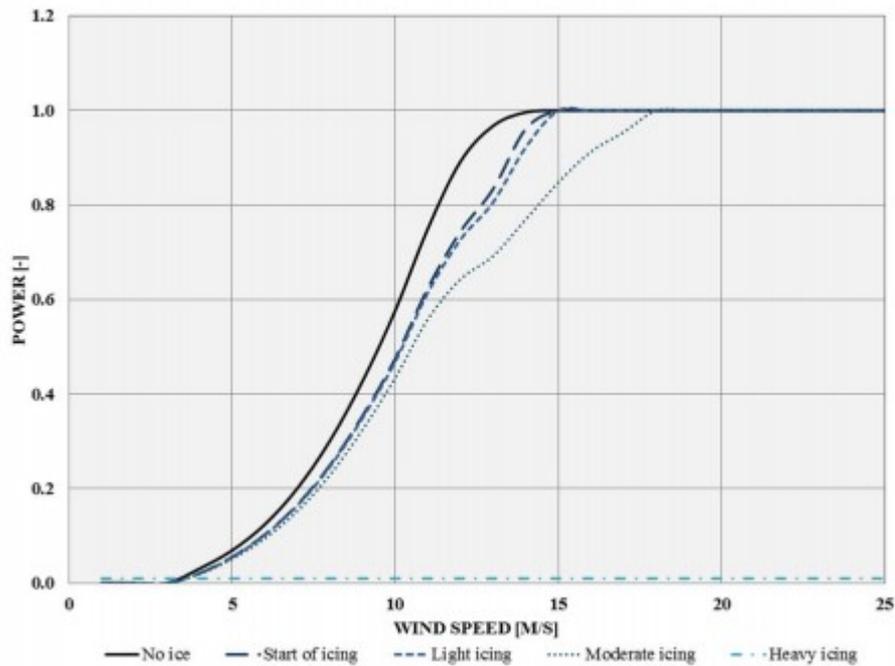
Оценка обледенения - непрерывный процесс, который мы обычно продолжаем анализировать даже на этапе эксплуатации ветропарка. Анализ данных SCADA проводится на регулярной основе в зимнее время для изучения событий обледенения с особым вниманием к оптимизации производительности ветряных турбин и повышению аспектов безопасности ветропарка.



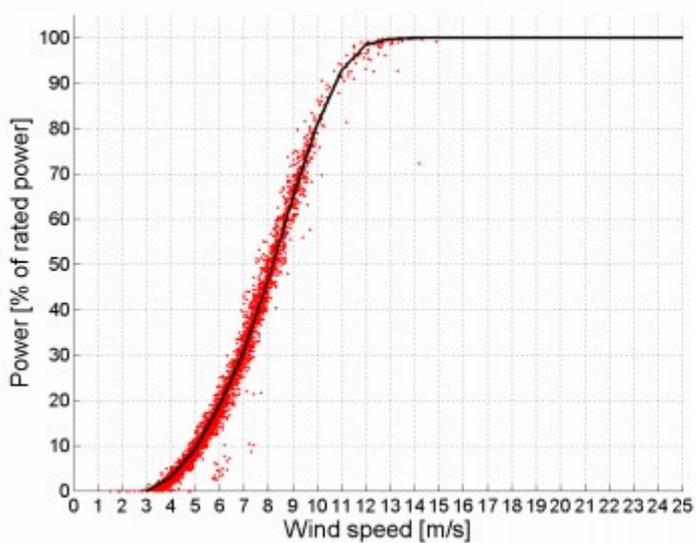
IEA Ice class	Meteorological icing	Instrumental icing	Icing loss
	% of year	% of year	% of gross annual production
5	>10	>20	> 20
4	5-10	10-30	10-25
3	3-5	6-15	3-12
2	0.5-3	1-9	0.5-5
1	0-0.5	<1.5	0 - 0.5



Глобальная карта обледенения



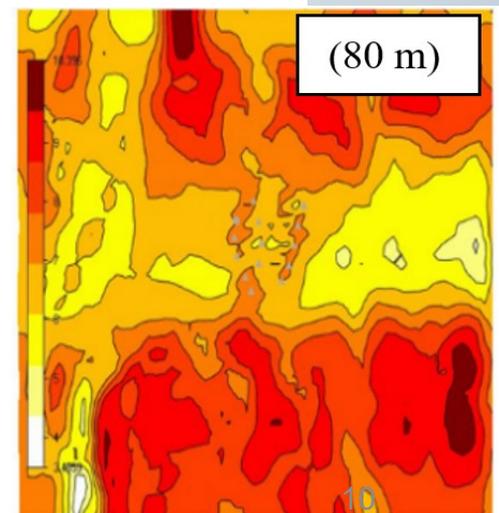
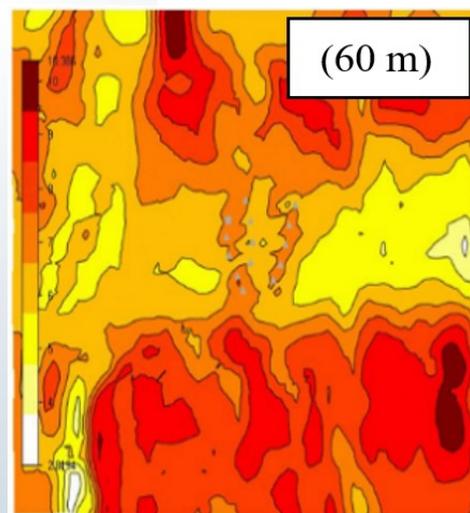
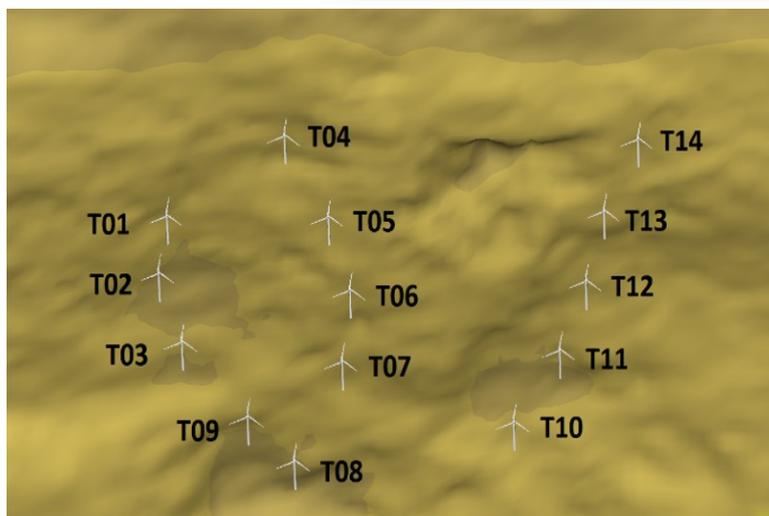
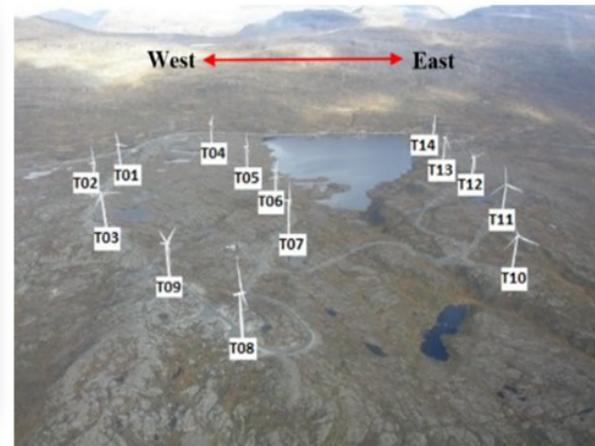
Пример: влияние льда на кривую выработки энергии ветряной турбины 3MW – ссылка [1]

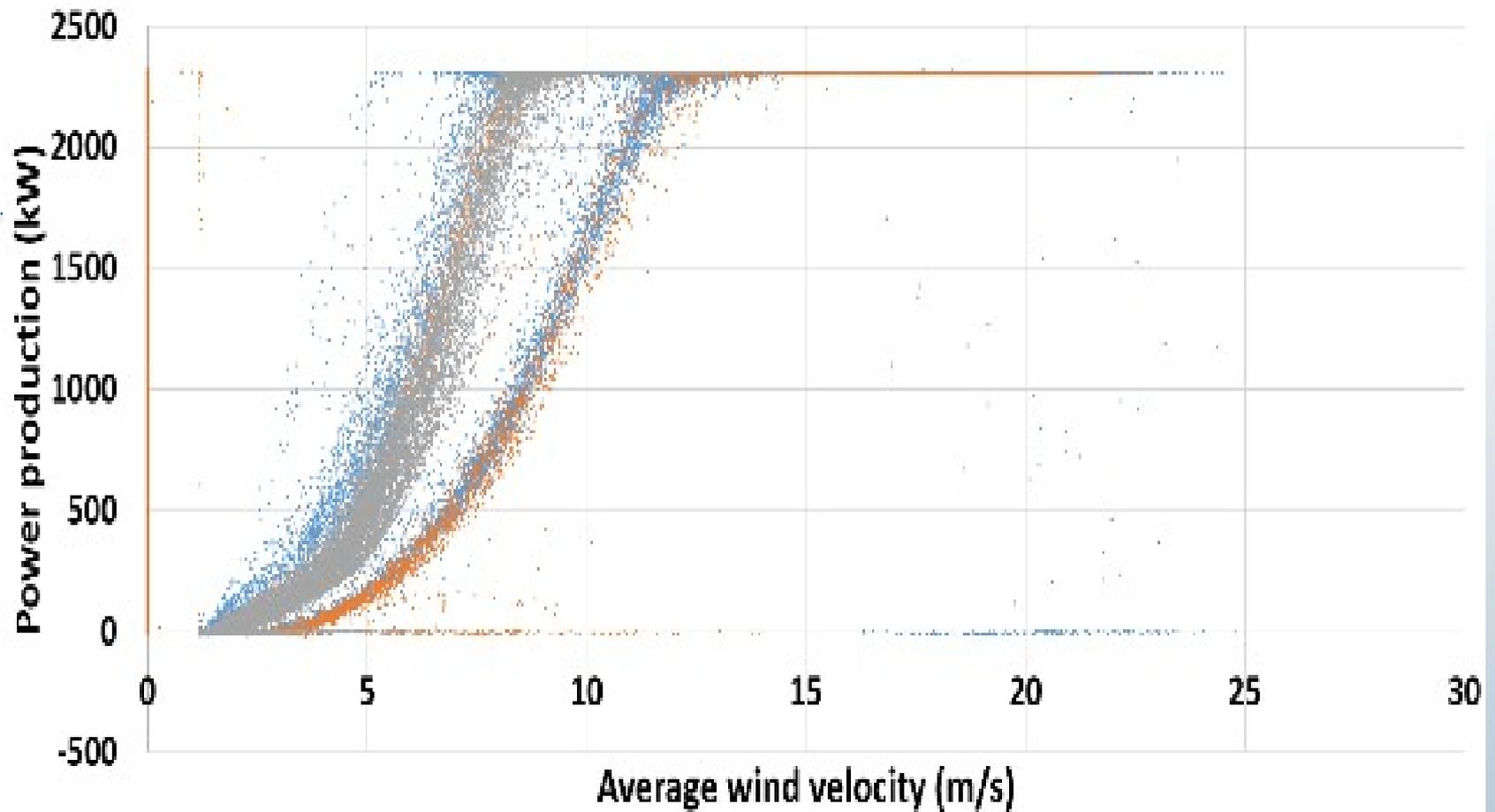


Пример: кривая выработки энергии в мае (слева) и в ноябре (справа) – ссылка [1]

Пример

Турбина	Siemens_23_93VS
Высота мачты	80 м
Диаметр ротора	90 м





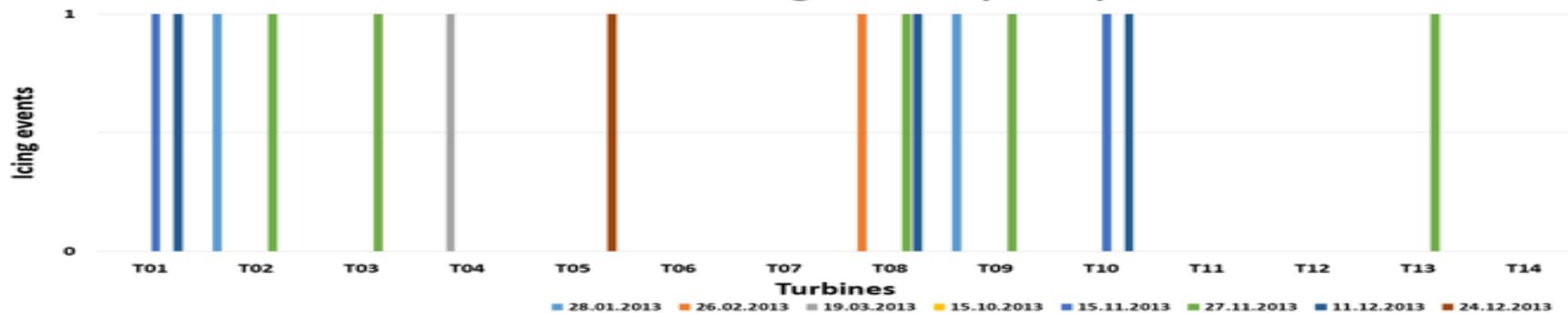
● Winter 1 ● Winter 2 ● Summer

Winter 1 (January - April)

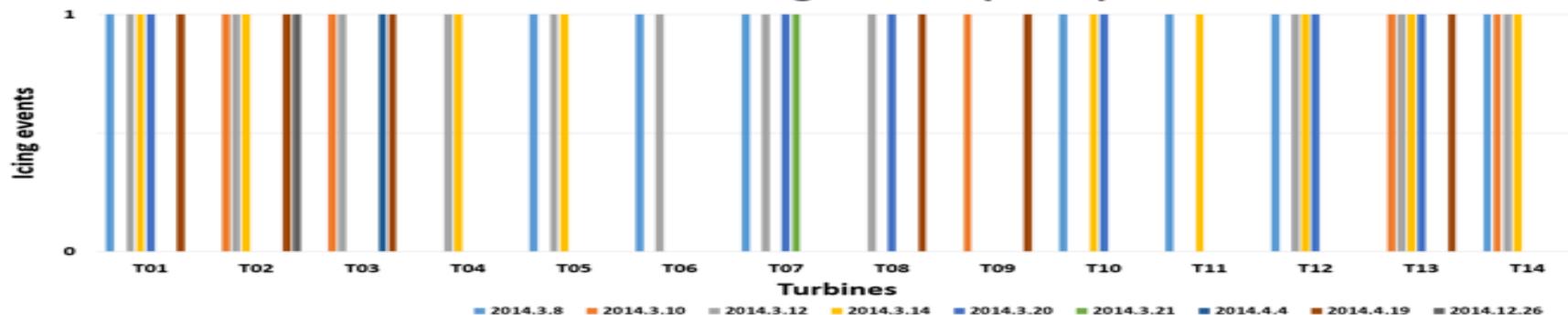
Winter 2 (October - December)

Summer (May - September)

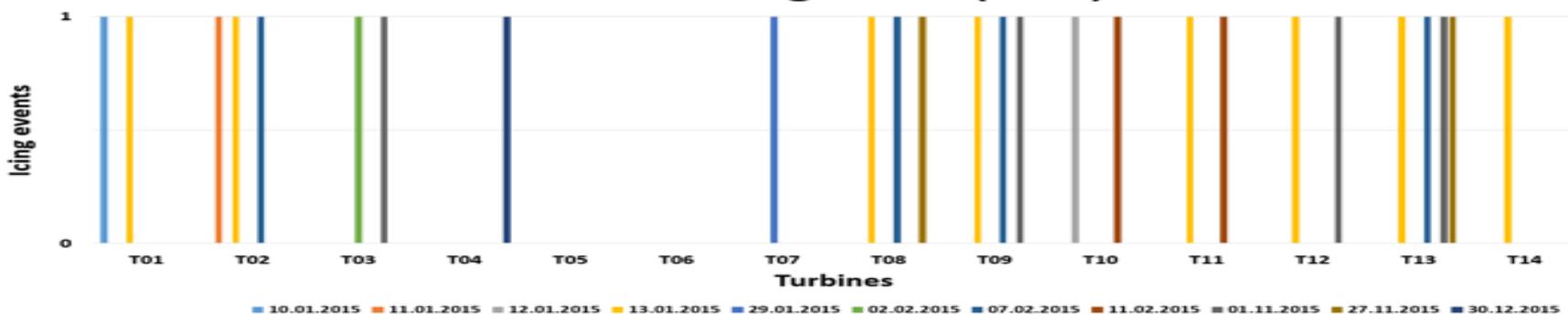
14 turbines icing events (2013)



14 turbines icing events (2014)

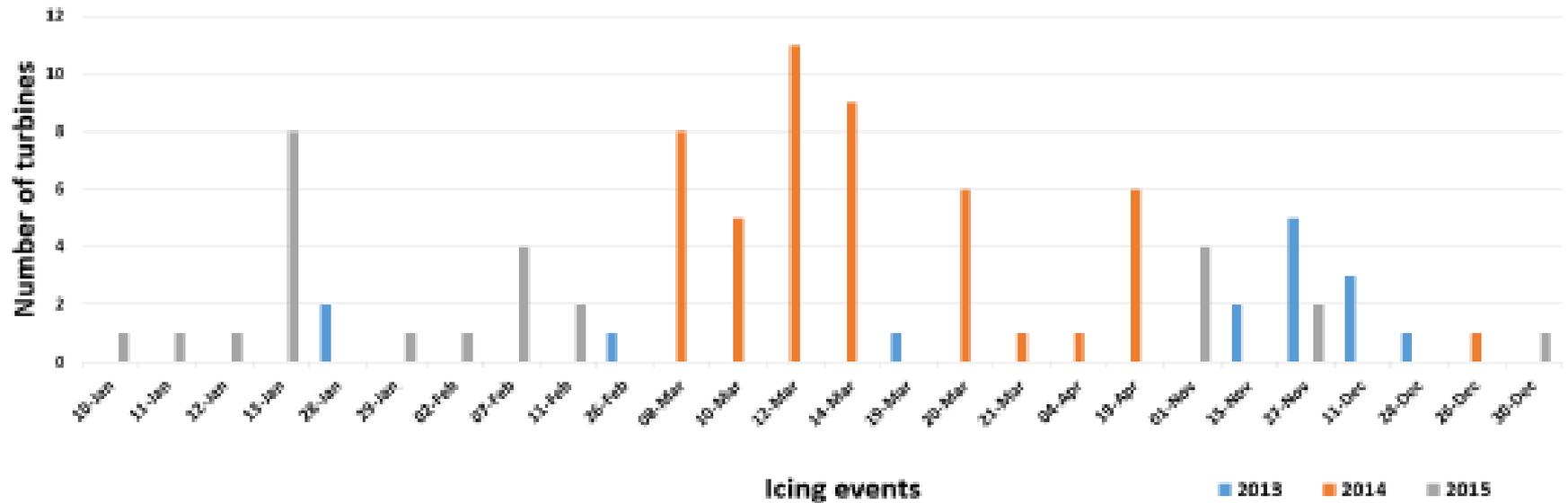


14 turbines icing events (2015)



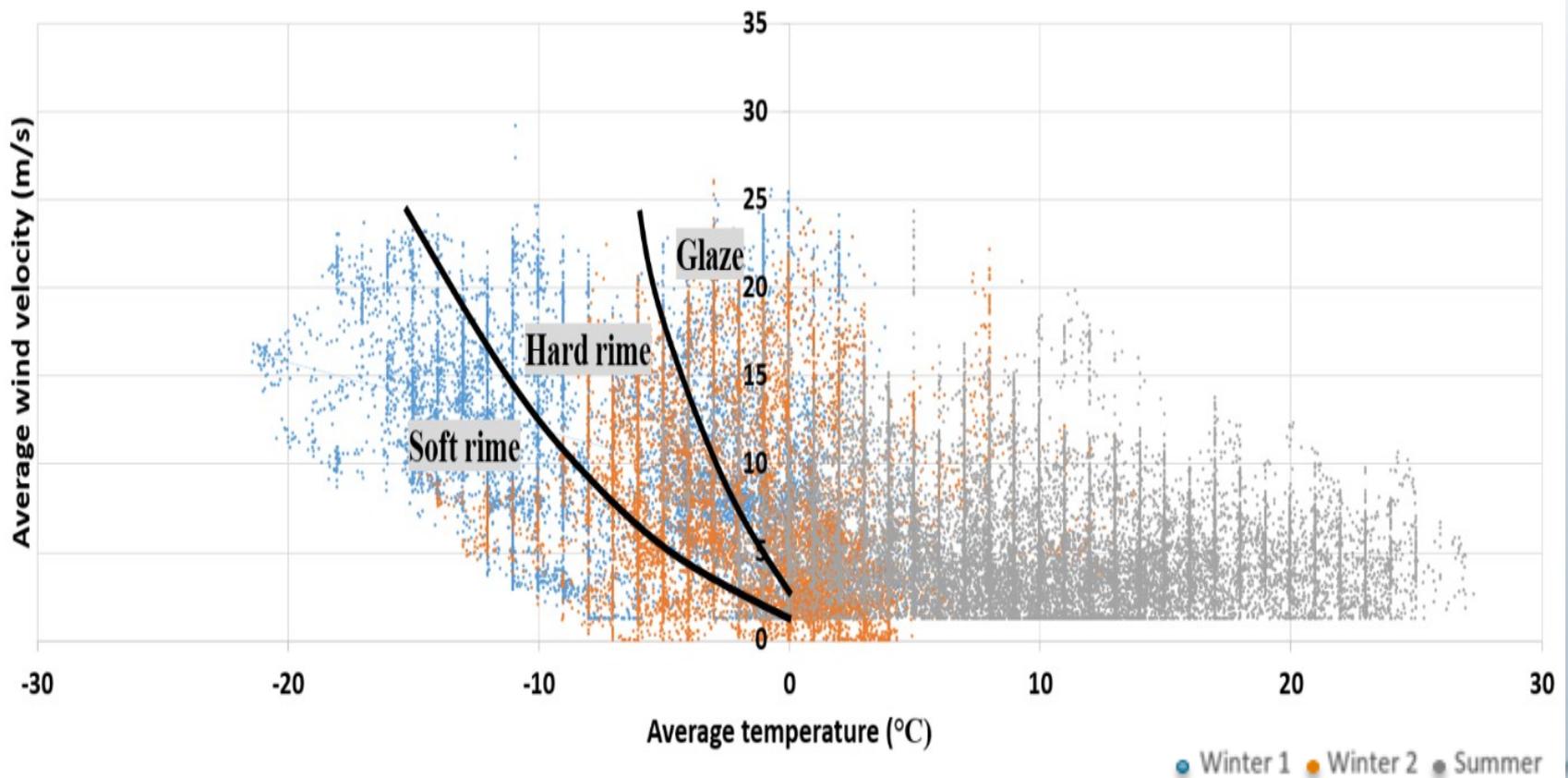
На диаграмме показано, что за три года (2013- 2015гг) случаи обледенения составляли **8, 9 и 11** дней.

Icing events (three years summarise of 14 turbines)



Классификация обледенения

Average temperature & Average wind velocity seasonal comparison in 2014 (Turbine 01)

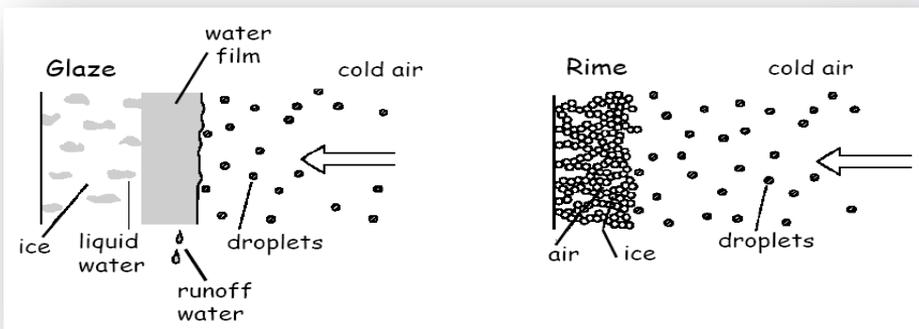


Обледенение ветряных турбин

Физика обледенения ветряных турбин

□ Темпы и форма атмосферного обледенения ветряных турбин зависит как от геометрических, так и атмосферных параметров, таких как:

- ✓ Расположение.
- ✓ Геометрические размеры.
- ✓ Материал поверхности.
- ✓ Скорость ветра.
- ✓ Температура воздуха.
- ✓ Размеры капель (MVD)
- ✓ Содержание жидкой воды (LWC).

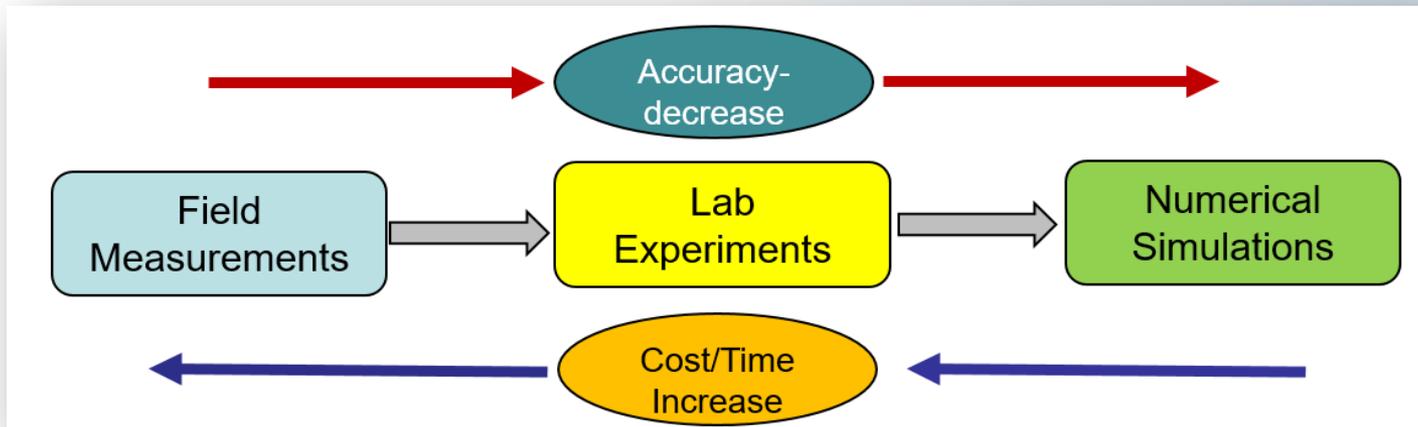
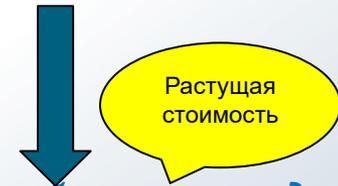


Type of ice	Density (kg/m ³)	Adhesion and cohesion	General Appearance	
			Colour	Shape
Glaze	900	Strong	transparent	Icicles
Wet Snow	300 to 600	Weak(forming)	White	Icicles
		Strong(frozen)		
Hard rime	600 to 900	Strong	Opaque	Pointing windward
Soft rime	200 to 600	Low to medium	white	Point windward

Методология

❑ Степень обледенения можно оценить с определенной точностью с помощью **полевых измерений, лабораторных экспериментов или численного моделирования**, поскольку:

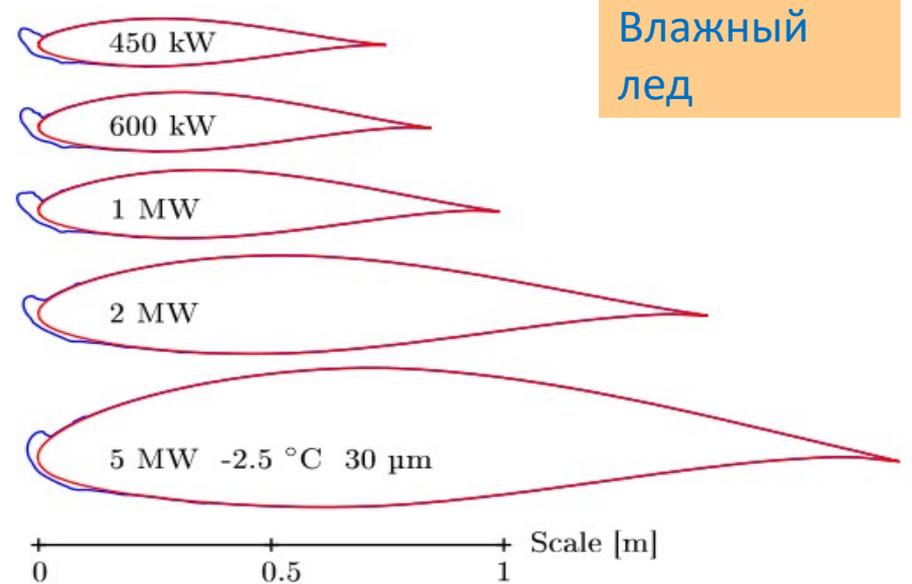
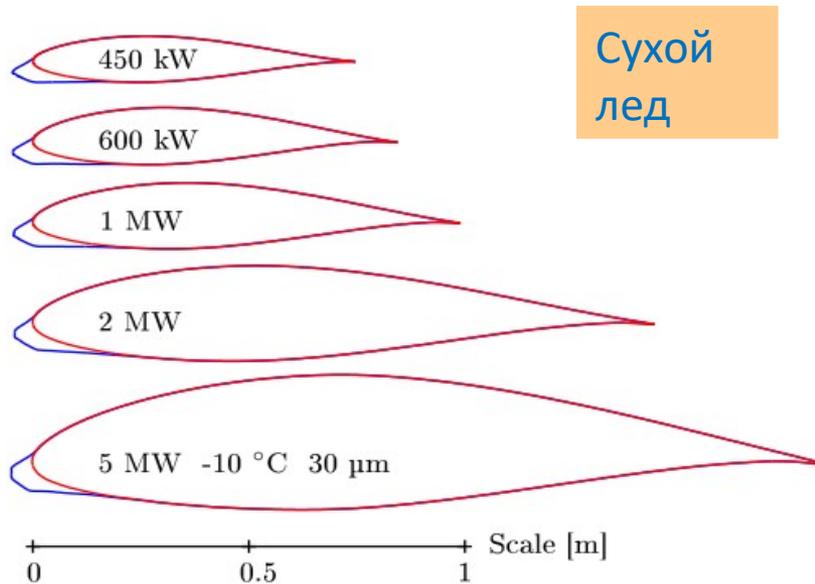
- ✓ Численное моделирование
- ✓ Лабораторное тоннельное испытание (Ветровой или ледяной тоннель)
- ✓ Полевое испытание



Численное моделирование атмосферного обледенения

- ❑ Численное моделирование атмосферного обледенения ветряных турбин – сложный комбинированный процесс, включающий, главным образом:
 - Поведение воздушного потока.
 - Поведение переохлажденных капель воды.
 - Характеристики пограничного слоя.
 - Фазовый переход, связанный с термодинамикой ледяной поверхности.

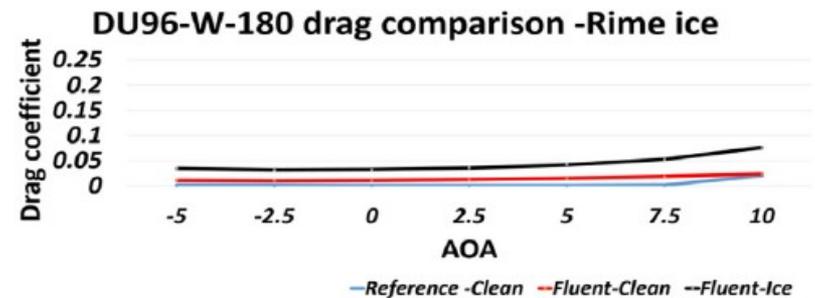
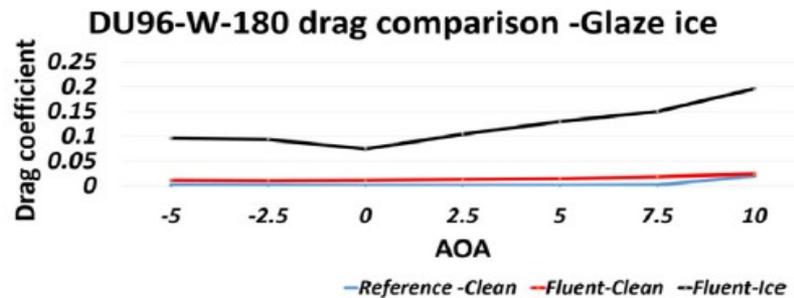
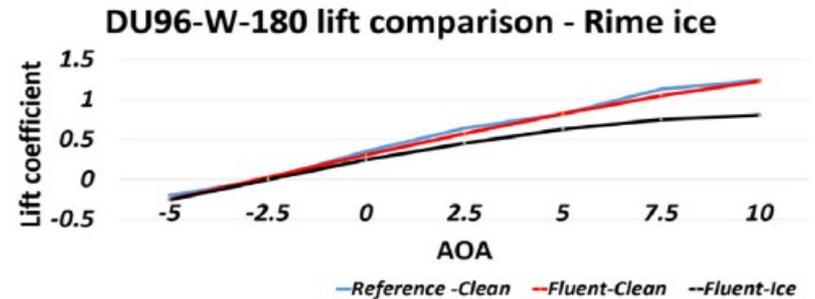
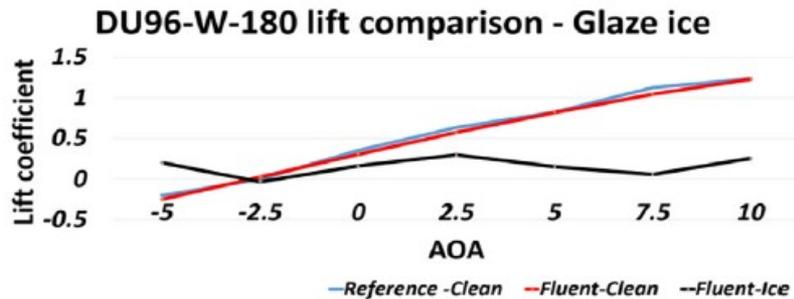
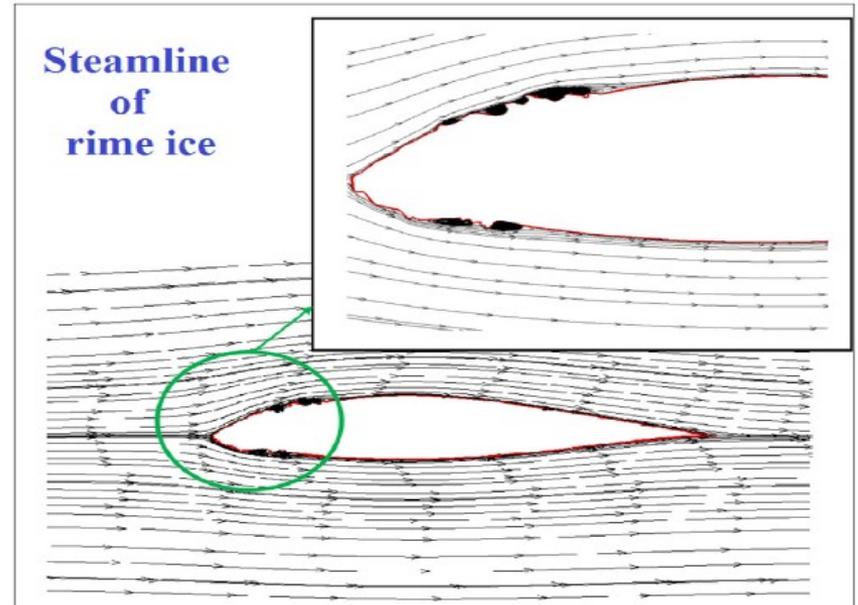
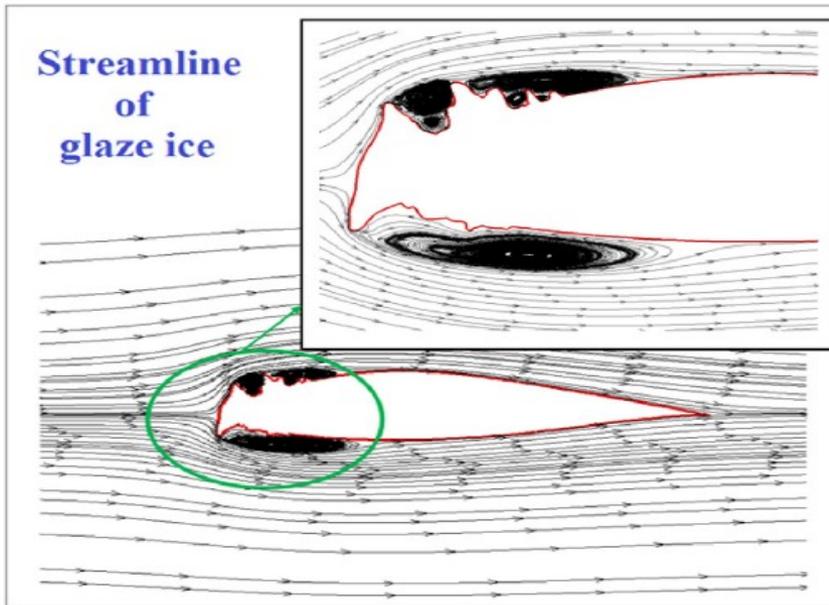




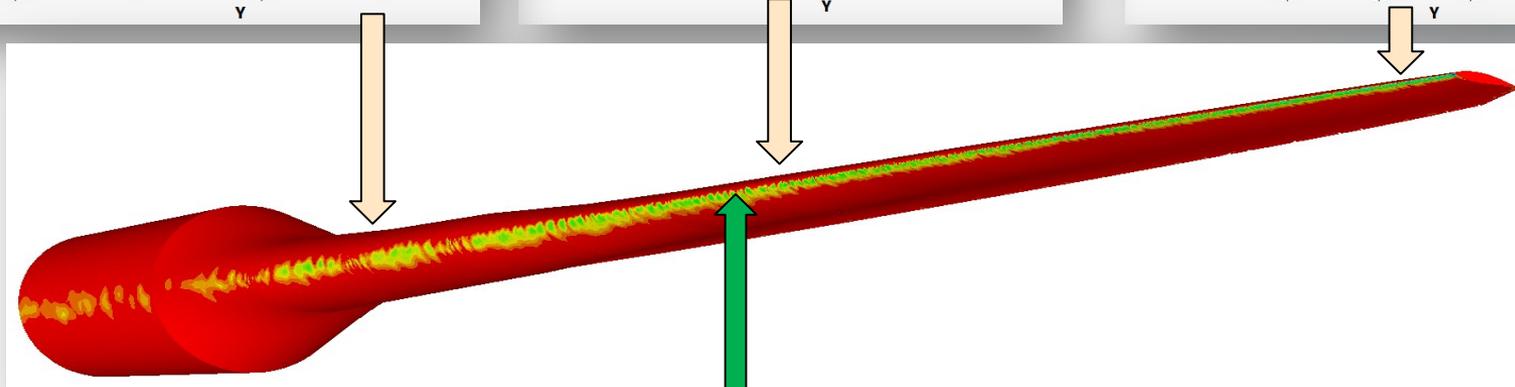
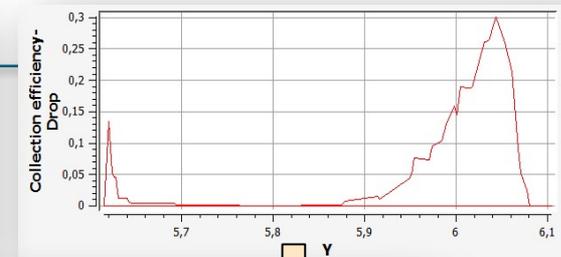
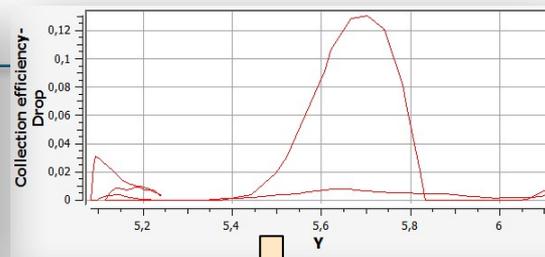
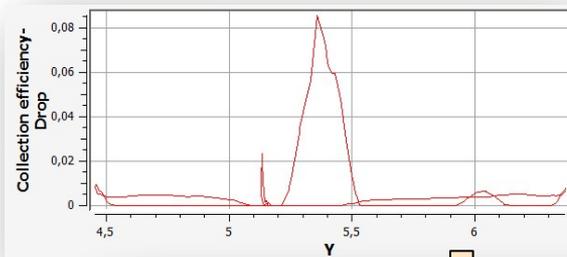
- ✓ Было проанализировано 5 профилей лопастей турбин различных размеров:

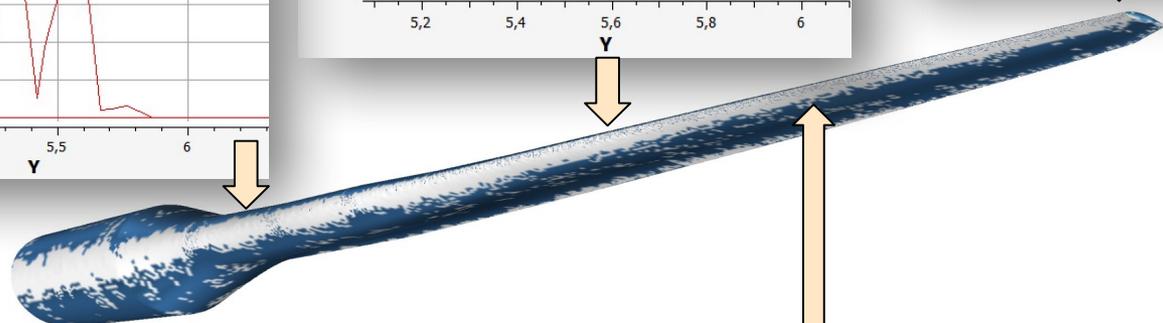
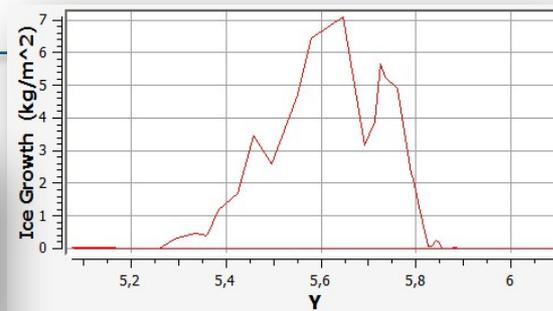
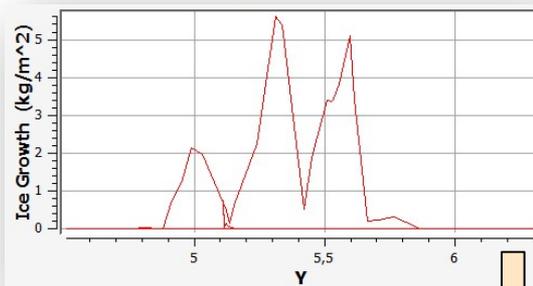
Анализ выполнен для сухих и влажных ледовых условий, $T = -2$ & -10 °C.

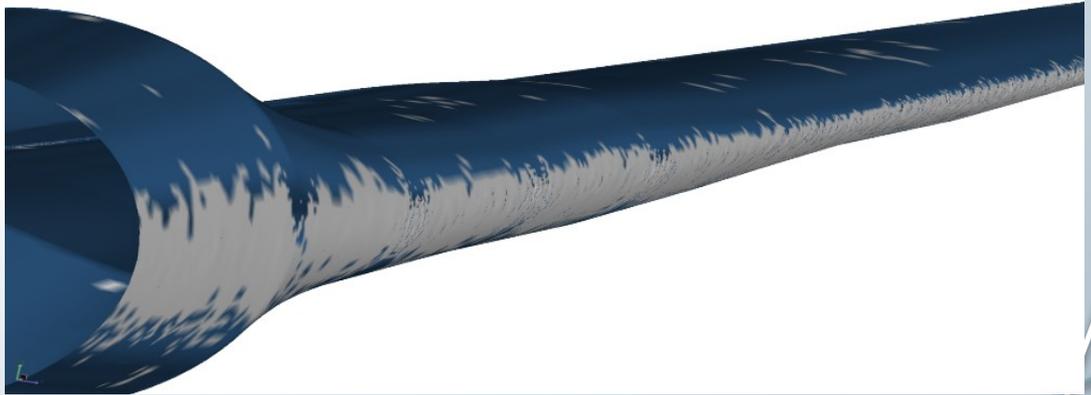
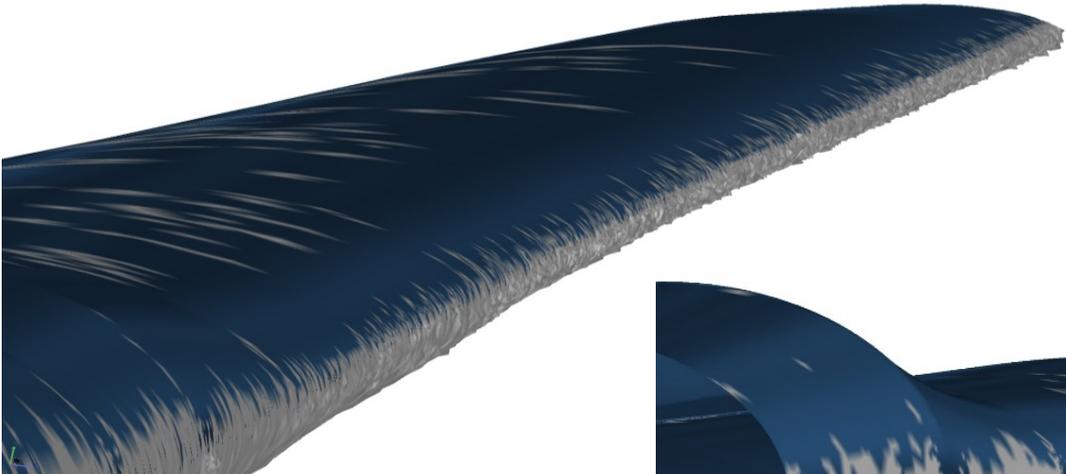
- ✓ Результаты показали, что обледенение меньше на более крупных ветряных турбинах как в отношении местной массы льда, так и в отношении толщины льда.



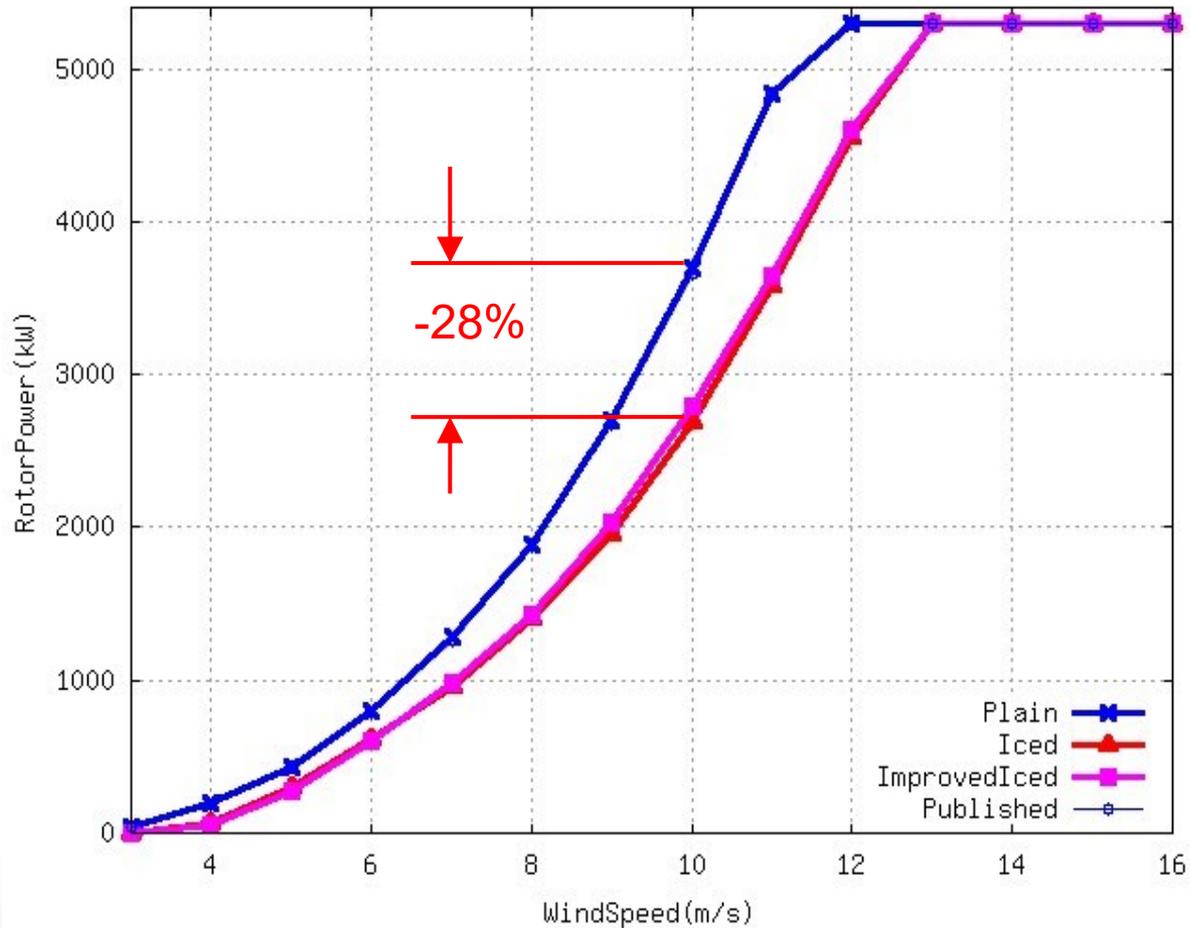




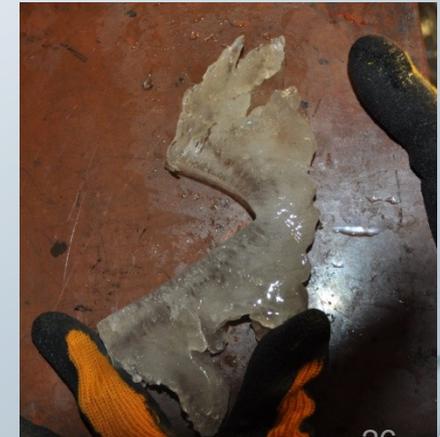
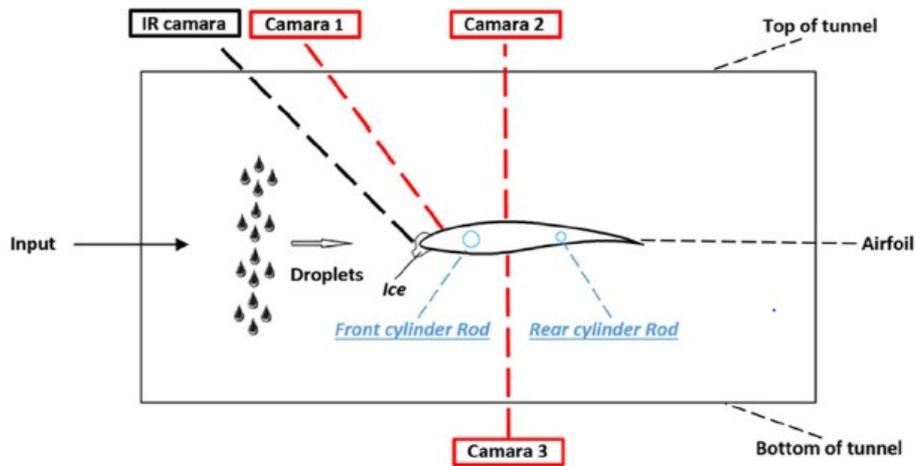




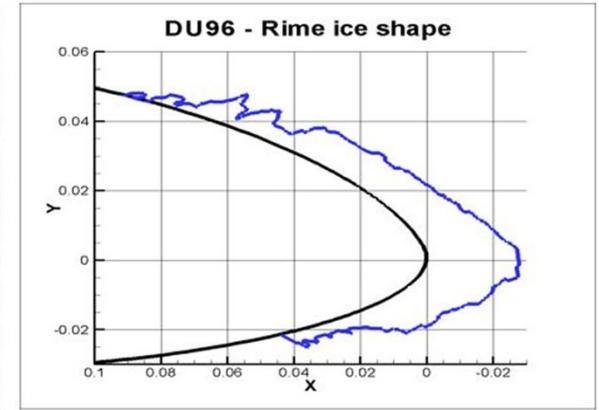
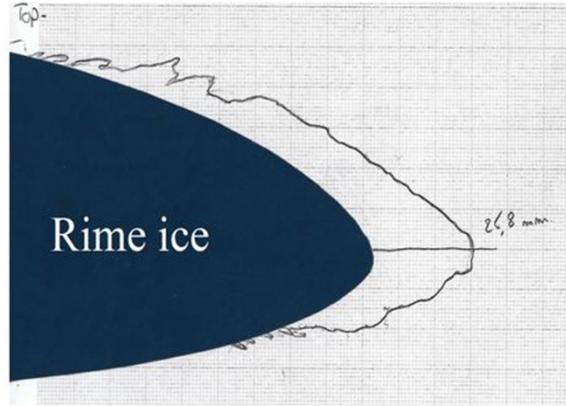
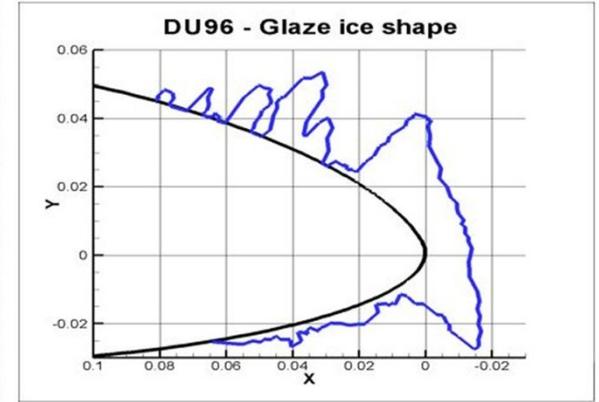
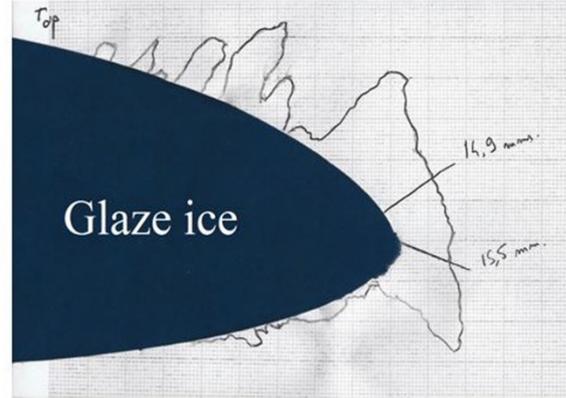
Free stream wind velocity, V_{∞} , [m/s]	10
Droplet size, MVD [μm]	20
Droplet size distribution	mono-disperse
Liquid water content, LWC [g/m^3]	0.22
Air temperature [$^{\circ}\text{C}$]	-10
Modeled time [min]	60



Лабораторное исследование атмосферного обледенения



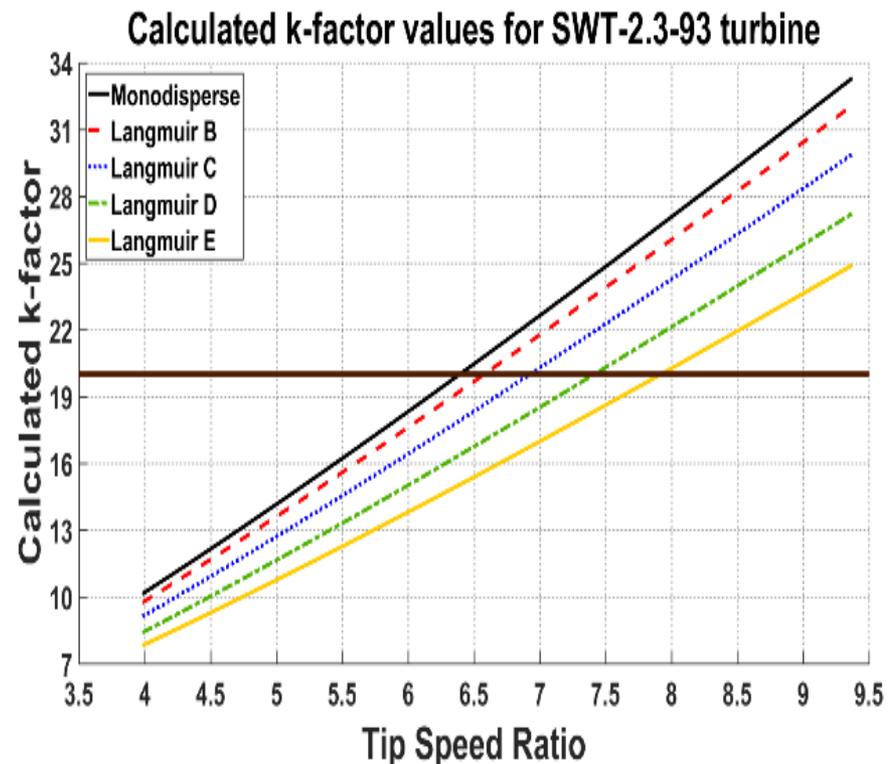
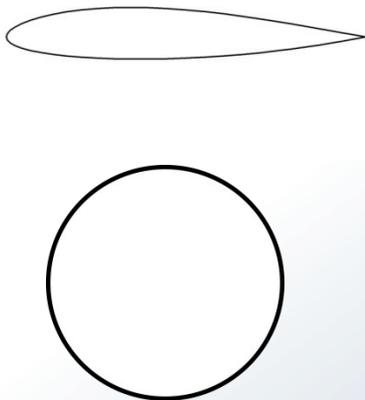
Explanation	Start	less ice accumulated	Ice accumulation without stagnation line	Start have glaze ice	Both sides of surface have significant glaze ice accumulation	Glaze ice start to move to stagnation line	Ice accumulation on stagnation line fully	End	
Front view									Glaze
Top view									
Side view									
Time zone (mins)	00:30	01:00	02:00	03:30	06:00	08:00	09:00	15:30	
	00:30	01:30	02:00	04:00	06:00	08:00	10:00	15:30	
Front view									Rime
Top view									
Side view									
Explanation	Start	less ice accumulated	Ice accumulation without stagnation line	Start ice accumulation on stagnation line	Both sides of surface have significant ice accumulation	Ice accumulation on stagnation line fully	Rime ice steadily accumulated fully	End	



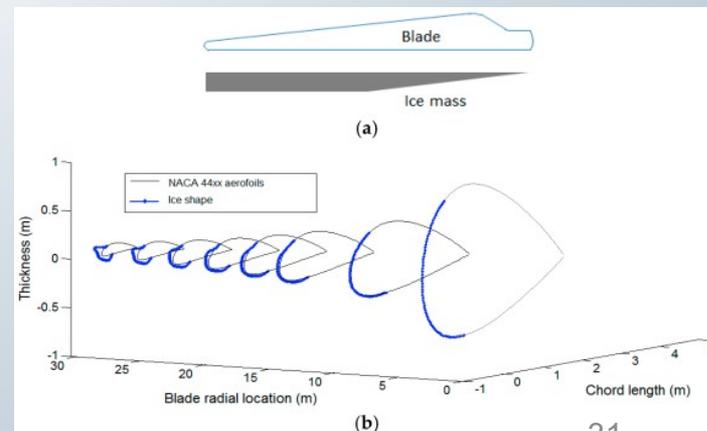
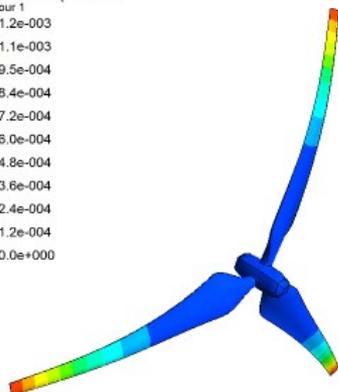
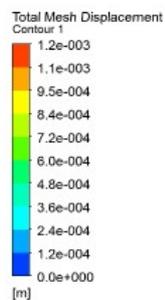
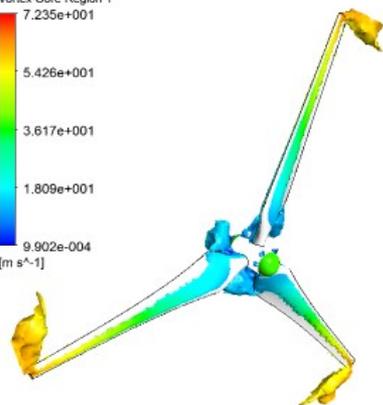
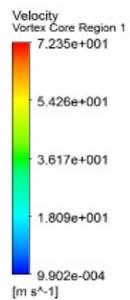


Аналитическое моделирование обледенения ветряных турбин

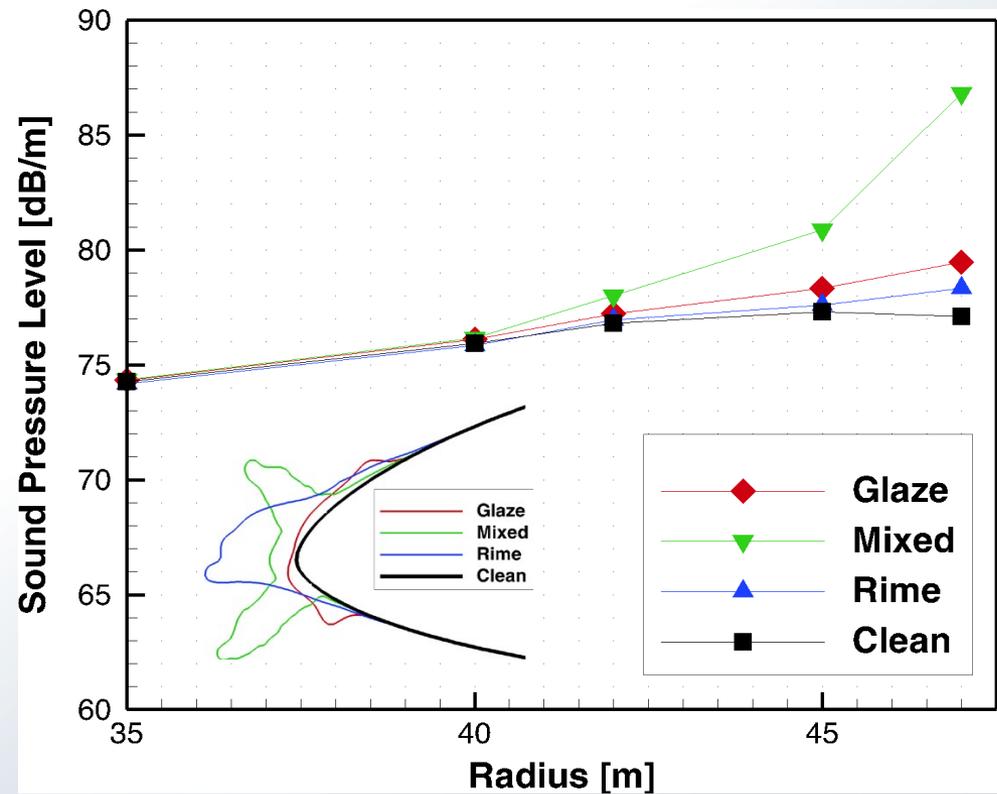
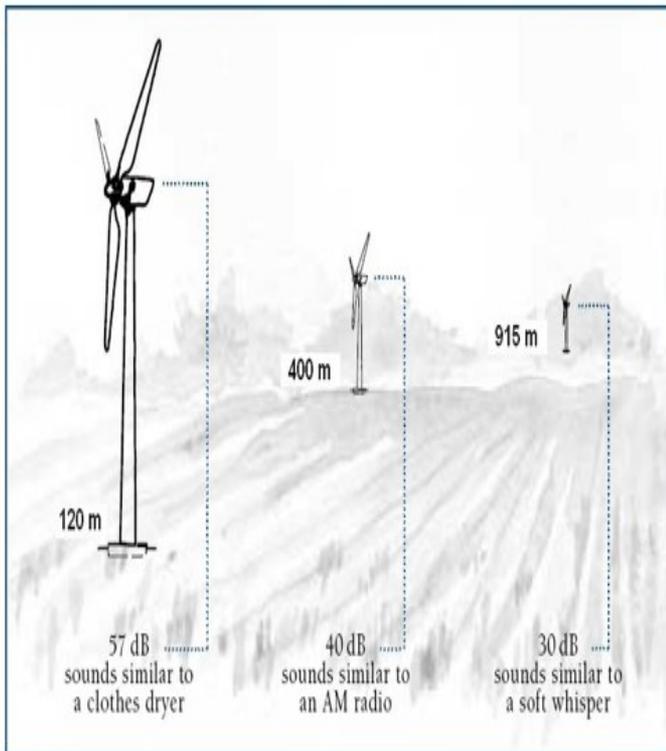
«Фактор k » описывает соотношение массы льда на контрольном коллекторе и на профиле лопасти турбины.



Конструктивная прочность/ледовая нагрузка

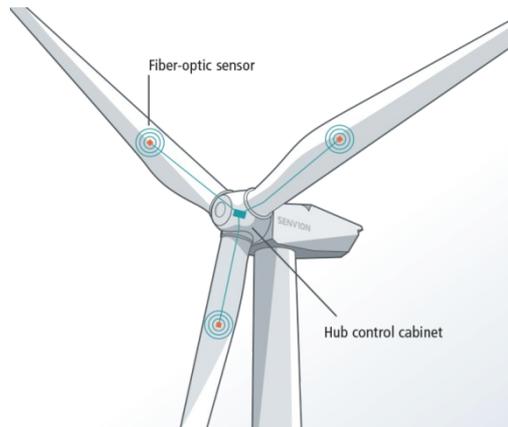
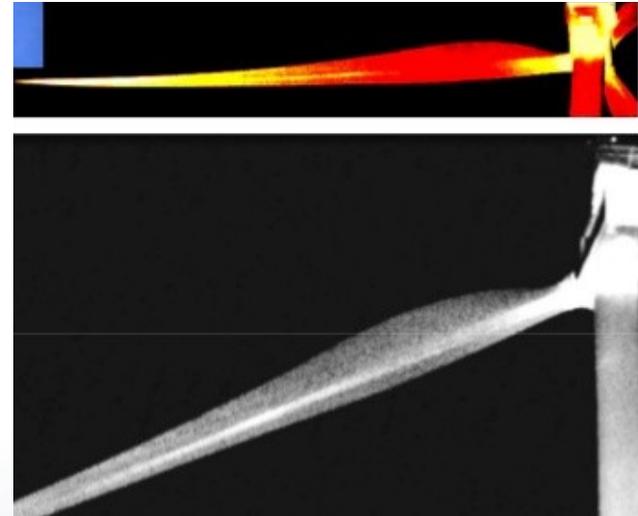


Усиление распространения шума



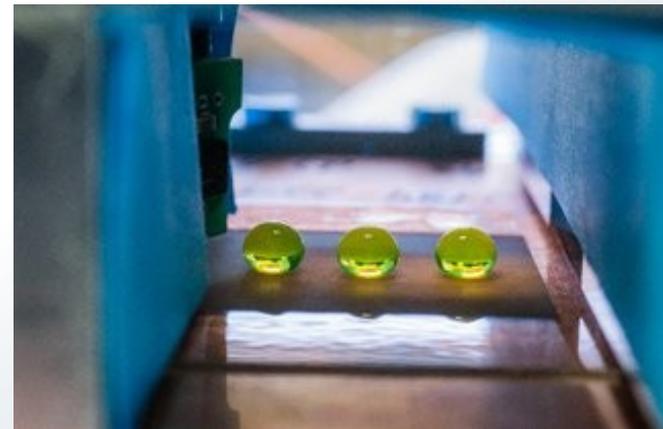
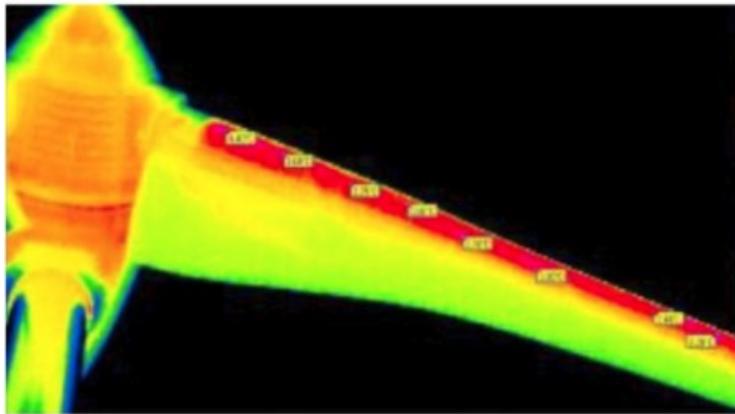
Обнаружение льда

- **Косвенный метод**
 - Производственные данные
- **Прямой метод**
 - Датчики на гондоле
 - Датчики на лопасти



Борьба с обледенением

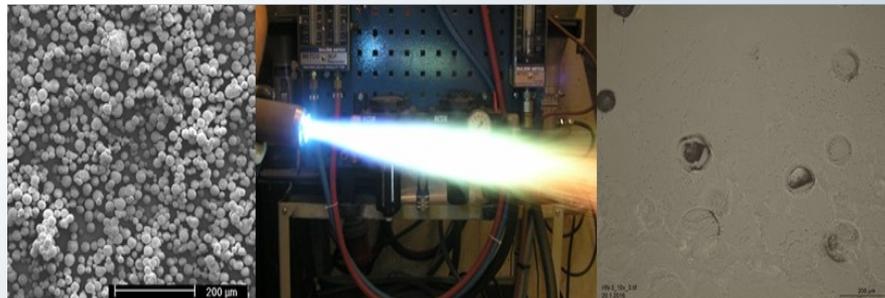
- ❑ Тепловой подход к удалению льда
- ❑ Антиобледенительное покрытие поверхности



Material

Thermal spraying

Coating



Куски льда

Для защиты от падающего льда обычно применяется правило безопасной дистанции от работающей установки

Безопасная дистанция = $1,5 \cdot (H + D)$,

Где

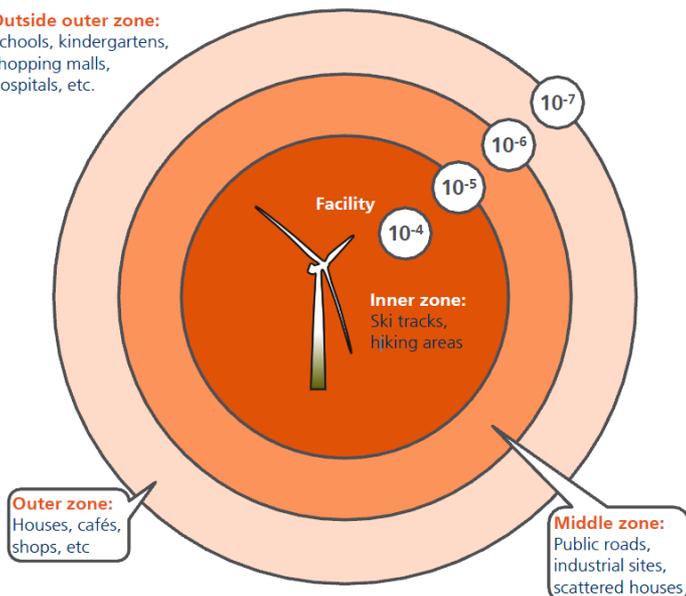
H = высота мачты турбины

D = диаметр ротора



Outside outer zone:

Schools, kindergartens, shopping malls, hospitals, etc.



©Lloyd's Register Consulting



СПАСИБО!

