

## Программный модуль «Кристалл» в 2025 году

Бендерской Л.А., Горячев А.В., Горячев П.А., Горячев Д.А., Нуриев М.В., Николаев А.А. (ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»),  
Рыбаков А.А (НИЦ «Курчатовский институт»)

Двенадцатый профессиональный слёт разработчиков отечественных CFD кодов  
«Отечественные CFD коды – 2025»



**29.12.2025**

Горячев П.А

# Программный модуль «Кристалл»\*

## Назначение:

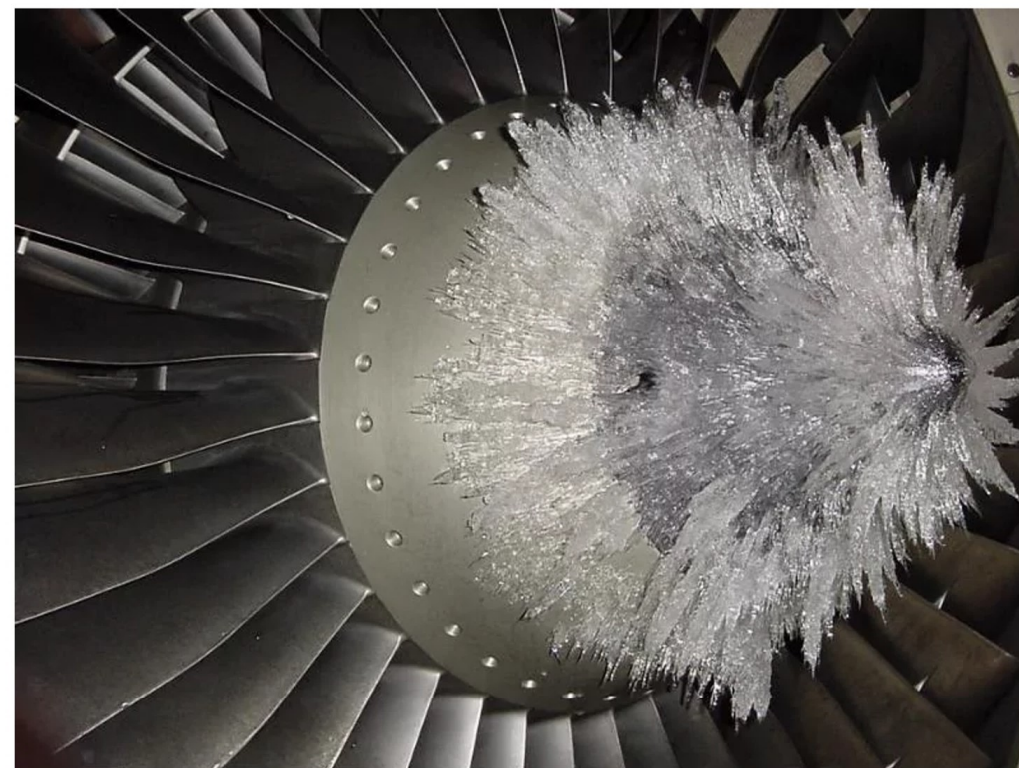
компьютерное моделирование:

- процессов обледенения несущих поверхностей, элементов фюзеляжа и двигателя,
- работы противообледенительных систем различных типов.

## Цель:

- обеспечение всепогодности и безопасности полётов,
- оптимизация конструкции противообледенительных систем (ПОС),
- организация противообледенительной защиты (ПОЗ) без применения ПОС,
- уменьшение энергопотребления ПОС и снижение весовых характеристик,
- сокращение сроков и стоимости сертификации,
- уменьшение количества стендовых и лётных испытаний вплоть до полной их замены расчётными методами.

\* Программный модуль компьютерного моделирования процесса обледенения элементов авиационных силовых установок («КРИСТАЛЛ 2023»). Авторы: Горячев А.В., Горячев П.А., Рыбаков А.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023666962 . Дата регистрации: 08.08.2023



- <https://trashbox.ru/link/kak-ispytyvayut-rossijskie-dvigateli-dlya-samolyotov>
- <https://vamosarema.com>



# Потребность решения практических задач в области обледенения

Расчёт массогабаритных характеристик льда в нормированных условиях обледенения:

- «классическое» обледенение,
- SLD крупные капли,
- ЛК и смесь фаз,
- *ледяные кристаллы,*
  - *На сухих поверхностях,*
  - *На влажных поверхностях,*
  - *На обогреваемых поверхностях,*
  - *На необогреваемых поверхностях.*

Моделирование работы ПОС,  
*повышение эффективности, снижение энергопотребления:*

- *электротепловые системы,*
- *воздушно тепловые системы,*
- *электроимпульсные системы.*

Моделирование удаления льда:

- *при отсутствии ПОС,*
- *в условиях включённой ПОС.*



## Разработка новых моделей, обеспечивающих решение указанных проблем

Усовершенствование моделей, учитывающих реальные физические процессы, сопровождающие формирование льда

## **Моделирование процесса обледенения компрессора двигателя в атмосферных условиях ледяных кристаллов и смеси фаз**



# Проблема обледенения двигателя летательного аппарата

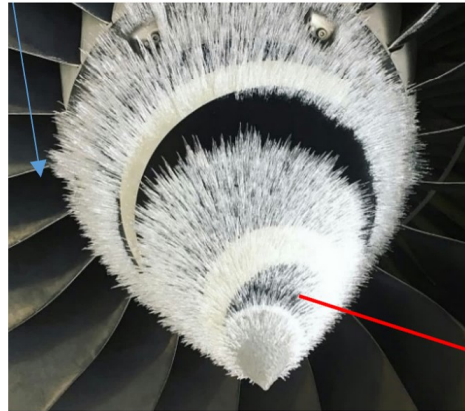
## Опасность для двигателя:

- повреждение лопаток,
- снижение мощности,
- повышение вибраций,
- повышение температуры газа,
- снижение ГДУ

## Типы обледенения:

- «Классическое» обледенение,
- SLD крупные капли,
- Смесь фаз,
- Ледяные кристаллы.

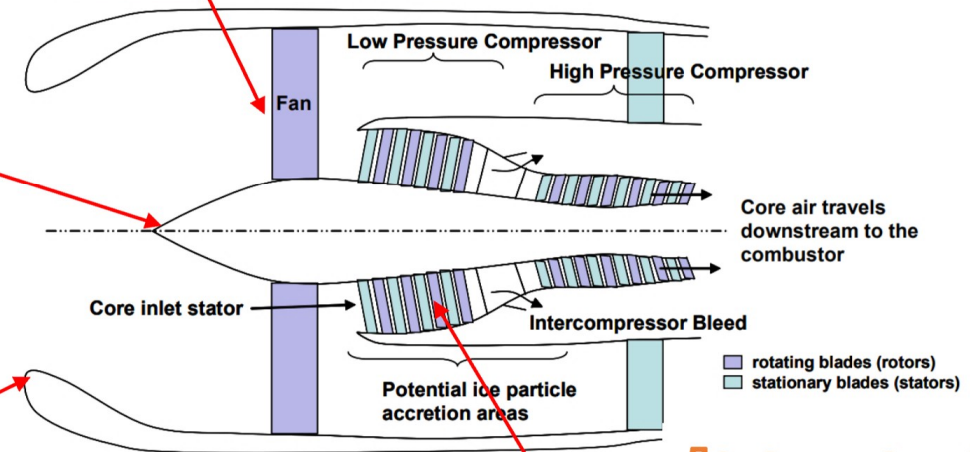
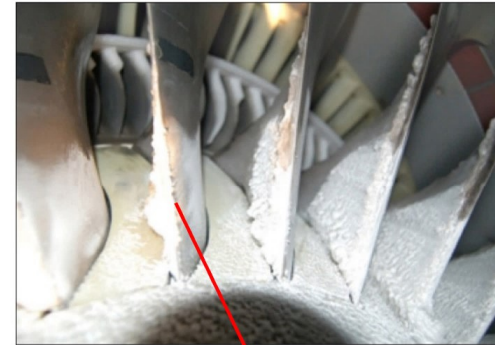
Обтекатель двигателя



Воздухозаборник



Лопатки вентилятора



Лопатки компрессора



Наименее проработанная область - моделирование процесса нарастания и срыва льда на элементах проточной части компрессора двигателя в условиях ледяных кристаллов

\* <https://hi-tech.mail.ru/news/56646-yaponcy-nazvali-shedevr-rossiyskoy-aviacii/>  
\*\* <http://avia-simply.ru/obledenienie-letatelnykh-apparatov/comment-page-1/>  
\*\*\* <https://news.myseldon.com/ru/news/index/308591162>  
\*\*\*\* <https://pressa.tv/prikolnoe/88200-prikolnye-fotografii-utrenniy-vypusk.html>  
\*\*\*\*\* <https://m.fotostrana.ru/public/post/343466/1252755702/>  
\*\*\*\*\* <https://www.nasa.gov/aeronautics/preps-continue-for-launching-engine-icing-research/>

# Риски обледенения при полётах в условиях ледяных кристаллов и смеси фаз

Неконтролируемая потеря тяги двигателя, повреждения лопаток компрессора (загиб кромки, отрывы), помпаж, остановка двигателя, срыв пламени.

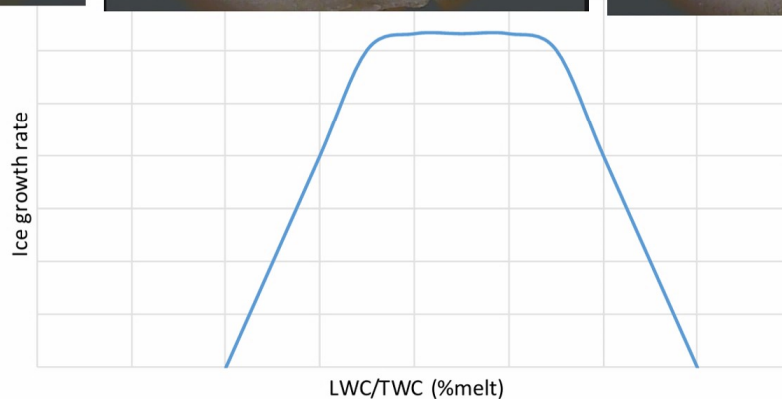
Обледенение может встречаться глубоко в двигателе, где температура поверхностей выше точки замерзания.

Сравнительные размеры крыльевого профиля и лопатки входного направляющего аппарата двигателя



## Трудности моделирования обледенения в условиях ЛК и смеси фаз

Немонотонность зависимости роста льда от степени подплавления кристаллов\*



Образование льда при воздействии сухих кристаллов на сухие обогреваемые поверхности.

### Физически парадоксальное явление

Классическое описание физического явления предполагает:

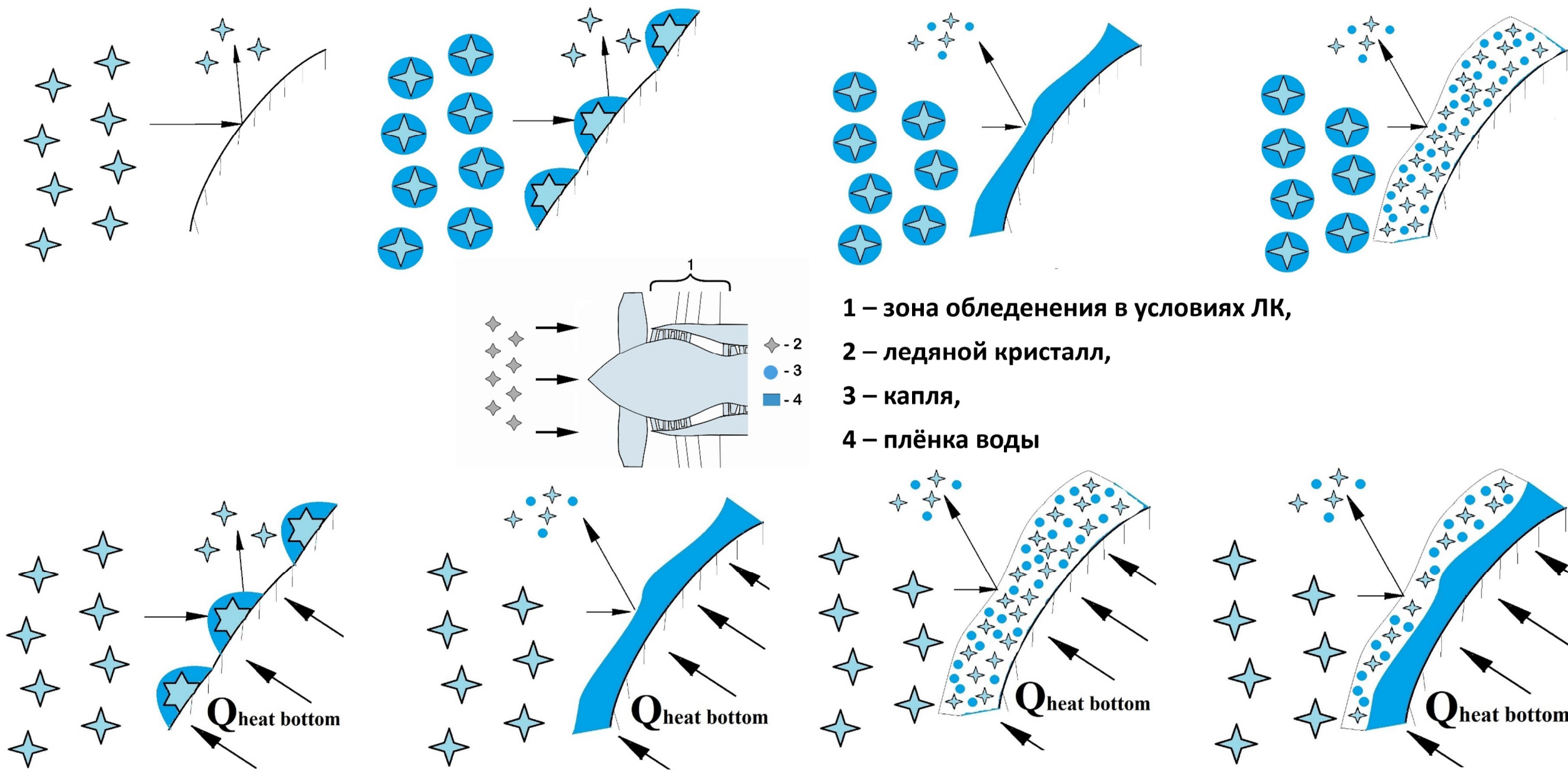
- отскок сухих кристаллов от сухой поверхности без образования льда,
- Наличие обогрева должно противодействовать замерзанию.

В эксперименте получено:

- Отсутствие льда при отсутствии обогрева,
- нарастание льда при наличии обогрева поверхности.

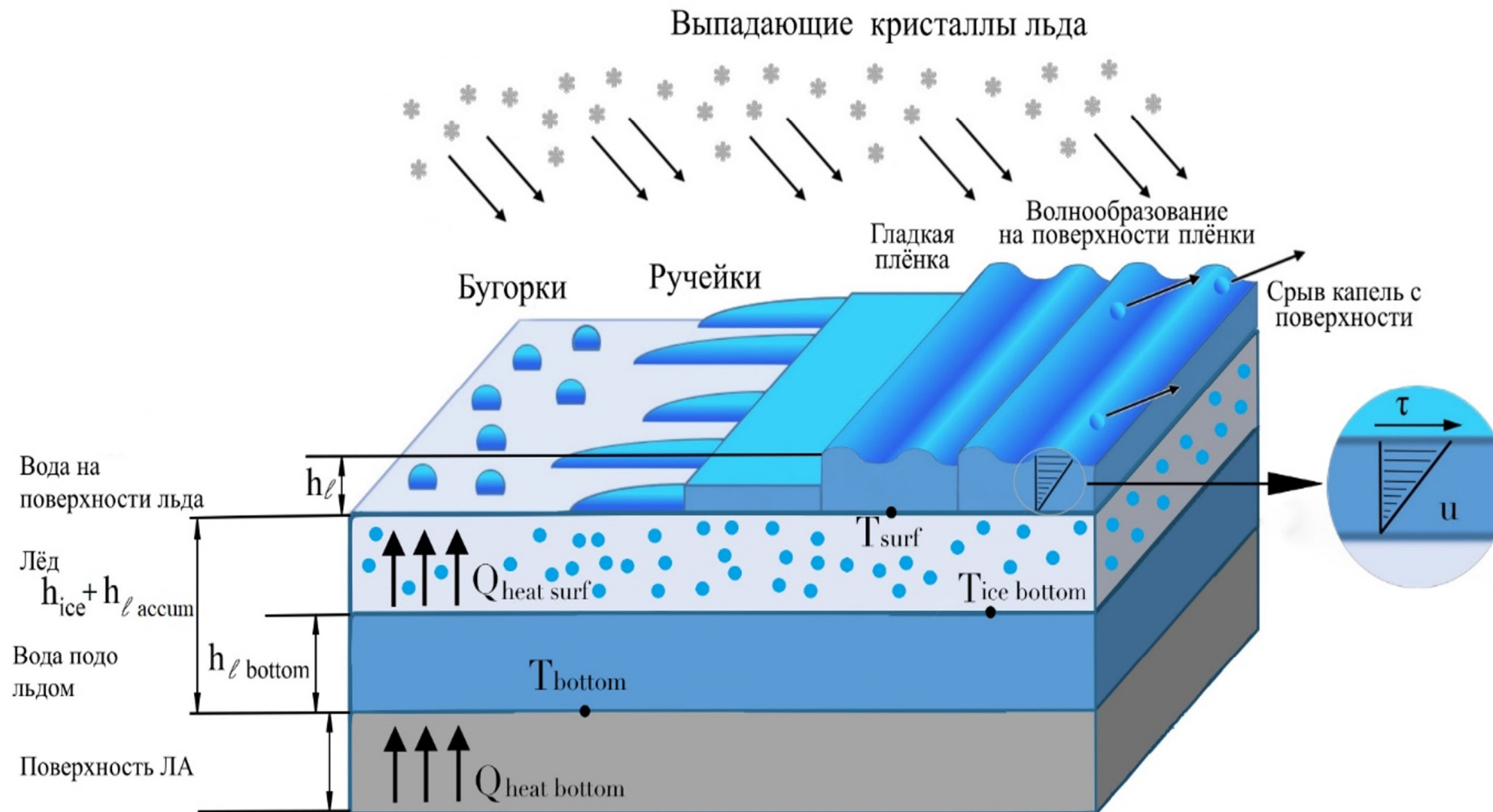


# Сценарии протекания физических процессов формирования льда в компрессоре





# Физическая модель трёхслойного ледяного нараста на обогреваемой поверхности

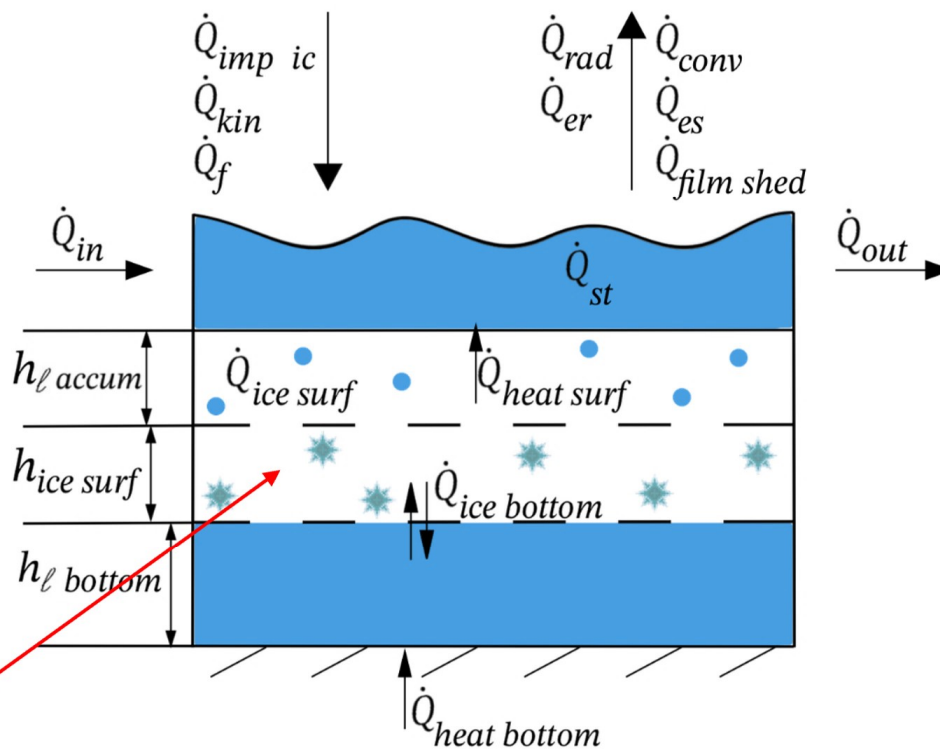
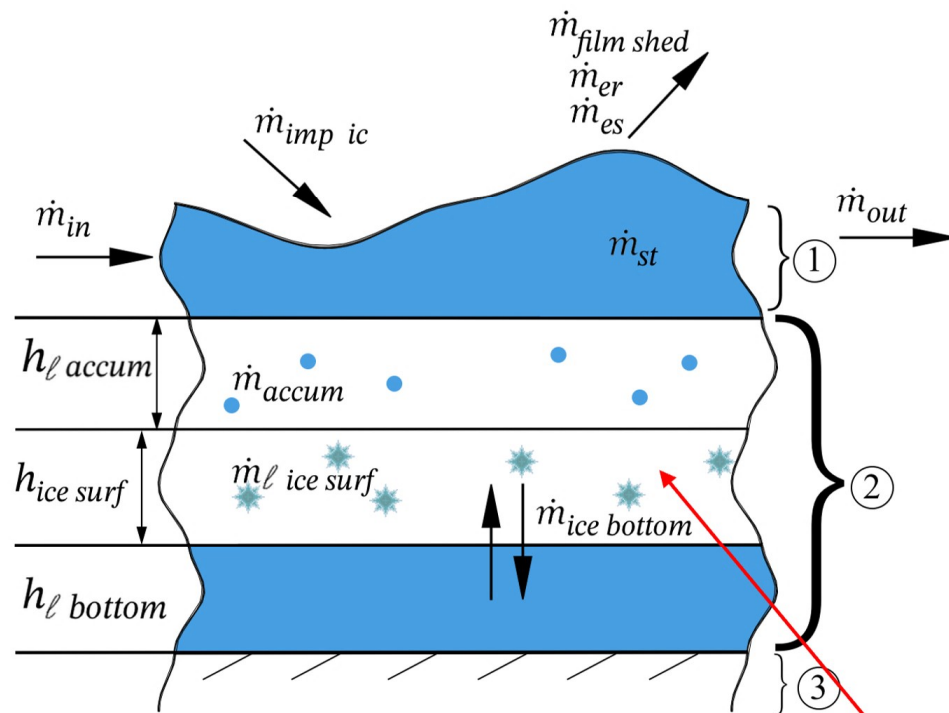


# Уравнения сохранения массы и энергии, описывающие роста льда в условиях ледяных кристаллов

## Уравнения сохранения массы и энергии

$$\rho_l \cdot \frac{\partial h_l + h_{accum}}{\partial t} + \rho_l \cdot \text{div}(\bar{u} h_l) = \dot{m}_{imp\_ic} - \dot{m}_{ice\ surf} - \dot{m}_{es} - \dot{m}_{er} - \dot{m}_{film\ shed}$$

$$\rho_l C_{p,l} \frac{\partial}{\partial t} ((h_l + h_{accum}) \bar{T}) + \rho_w \cdot \text{div}(\bar{u} h_l C_{p,l} \bar{T}) = \\ = \dot{Q}_{kin} + \dot{Q}_f + \dot{Q}_{ice\ surf} - \dot{Q}_{imp\ ic} - \dot{Q}_{conv} - \dot{Q}_{es} - \dot{Q}_{er} - \dot{Q}_{rad} - \dot{Q}_{film\ shed} + \dot{Q}_{heat\ surf}$$



Ледяная шуга (вода, аккумулированная в слое кристаллов льда)

# Модель ледяной шуги

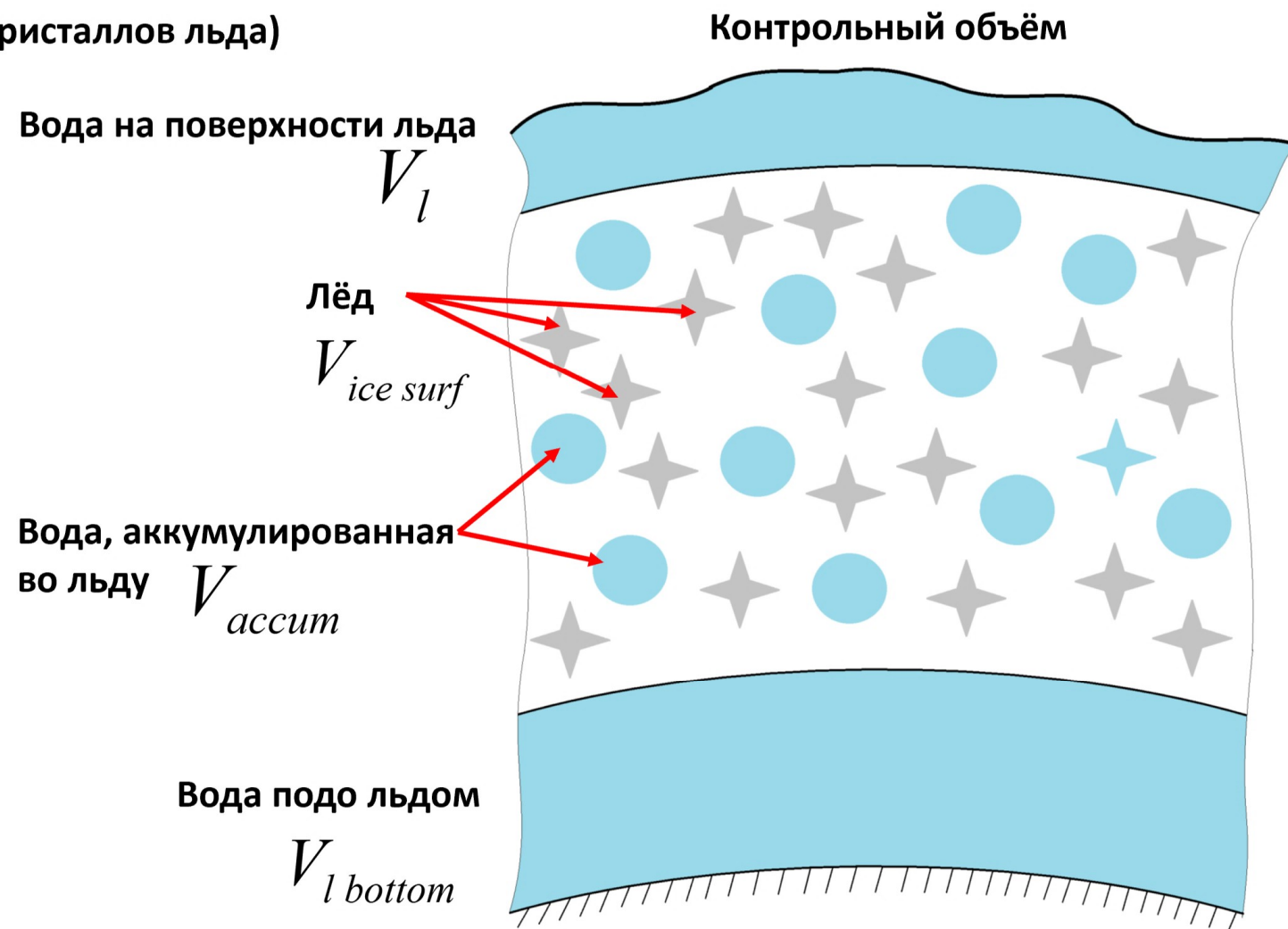
Модель ледяной шуги (аккумуляция воды в слое кристаллов льда)

Потенциал аккумуляции воды слоем льда

$$\Phi = f(V_{accum}, V_{ice surf}, V_l, V_{l bottom})$$

Объёмная доля жидкости в КО

$$\alpha_l = \frac{V_l + V_{accum} + V_{l bottom}}{V_l + V_{accum} + V_{l bottom} + V_{ice surf}}$$





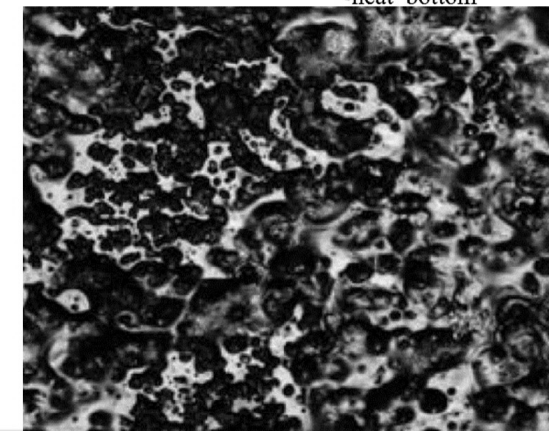
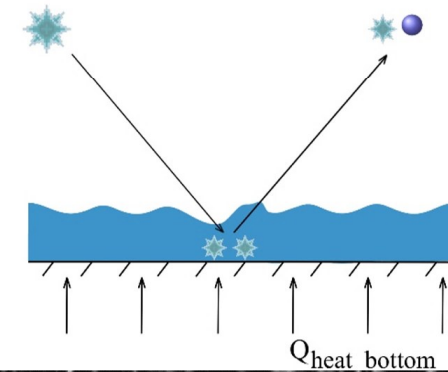
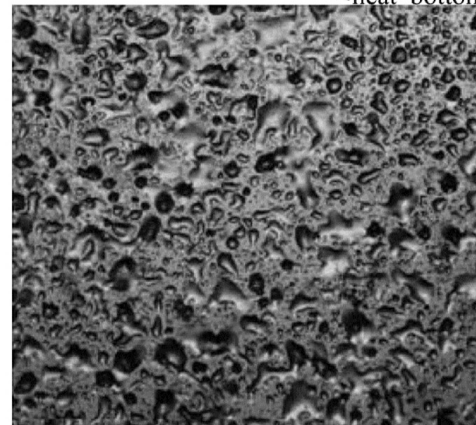
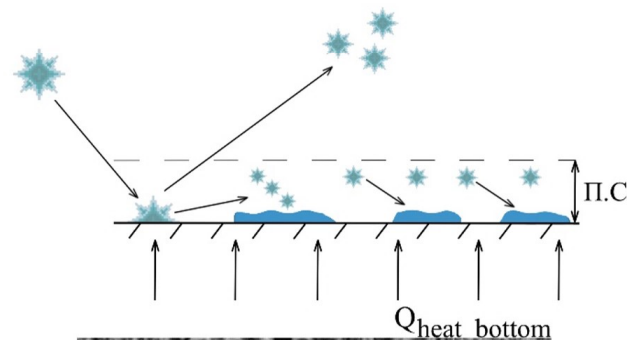
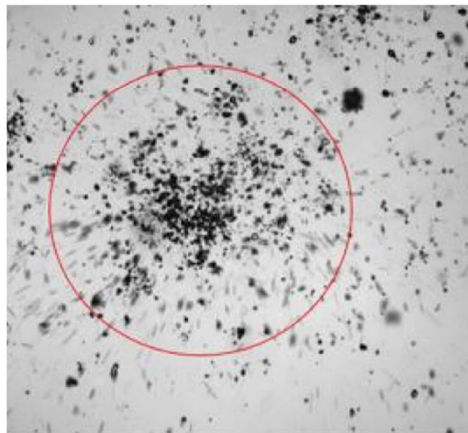
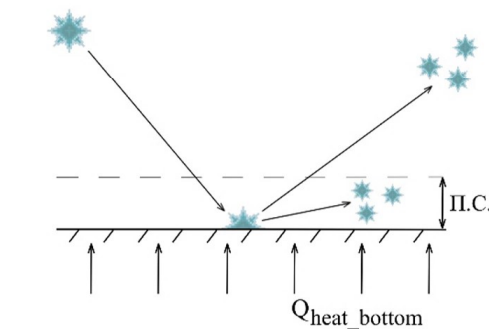
# Осаждение ледяных кристаллов

Модель осаждения ледяных кристаллов и смеси фаз на поверхность в условиях:

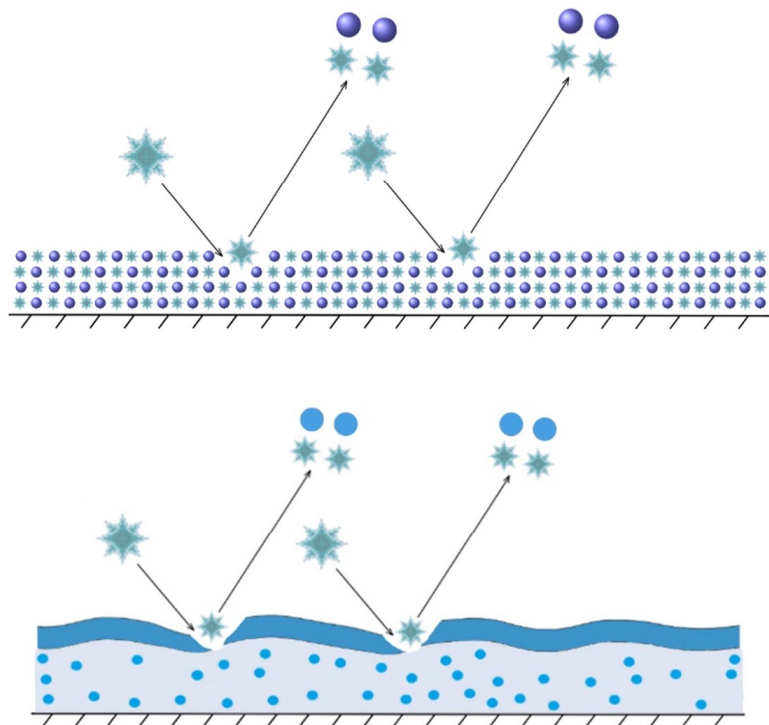
- смеси фаз –  $P_{d1} > 0$ ,
- жидкой плёнки на поверхности объекта –  $P_{d2} > 0$ ,
- сухого кристалла и сухой необогреваемой поверхности -  $P_{d3} \approx 0$ ,
- сухого кристалла и сухой обогреваемой поверхности –  $P_{d3} > 0$ .

$P_{d1}$  – коэффициент осаждения кристаллов

$$P_D = \max(P_{D1}, P_{D2}, P_{D3})$$



# Эрозия поверхности ледяного нароста в условиях ледяных кристаллов



$$\dot{m}_{er} = \dot{m}_{er\ ic} + \dot{m}_{er\ accum}$$

$$\dot{m}_{er} = \eta_{ic}^{er} \cdot \dot{m}_{imp\ ic}$$

- поток массы за счет суммарной эрозии,

$$\dot{m}_{er\ ic} = \eta_{ic}^{er} \cdot \dot{m}_{imp\ ic} \cdot (1 - \alpha_l)$$

- поток массы за счет эрозии слоя льда,

$$\dot{m}_{er\ accum} = \eta_{ic}^{er} \cdot \dot{m}_{imp\ ic} \cdot \alpha_l$$

- поток массы за счет эрозии слоя аккумулятивной воды,

$\alpha_l$  - объемная доля жидкости в КО,

## Модель эрозии с учётом пластической и режущей деформации

Поток массы за счёт эрозии

$$\dot{m}_{er} = \eta_{ic}^{er} \cdot \dot{m}_{imp\ ic}$$

$$\eta_{er, crys, ice} = F_s \cdot \rho \cdot \frac{Vol_C + Vol_D}{\dot{m}_{imp\_ic}} = \eta_{er, crys, ice}^D + \eta_{er, crys, ice}^C$$

Пластическая  
эрозия

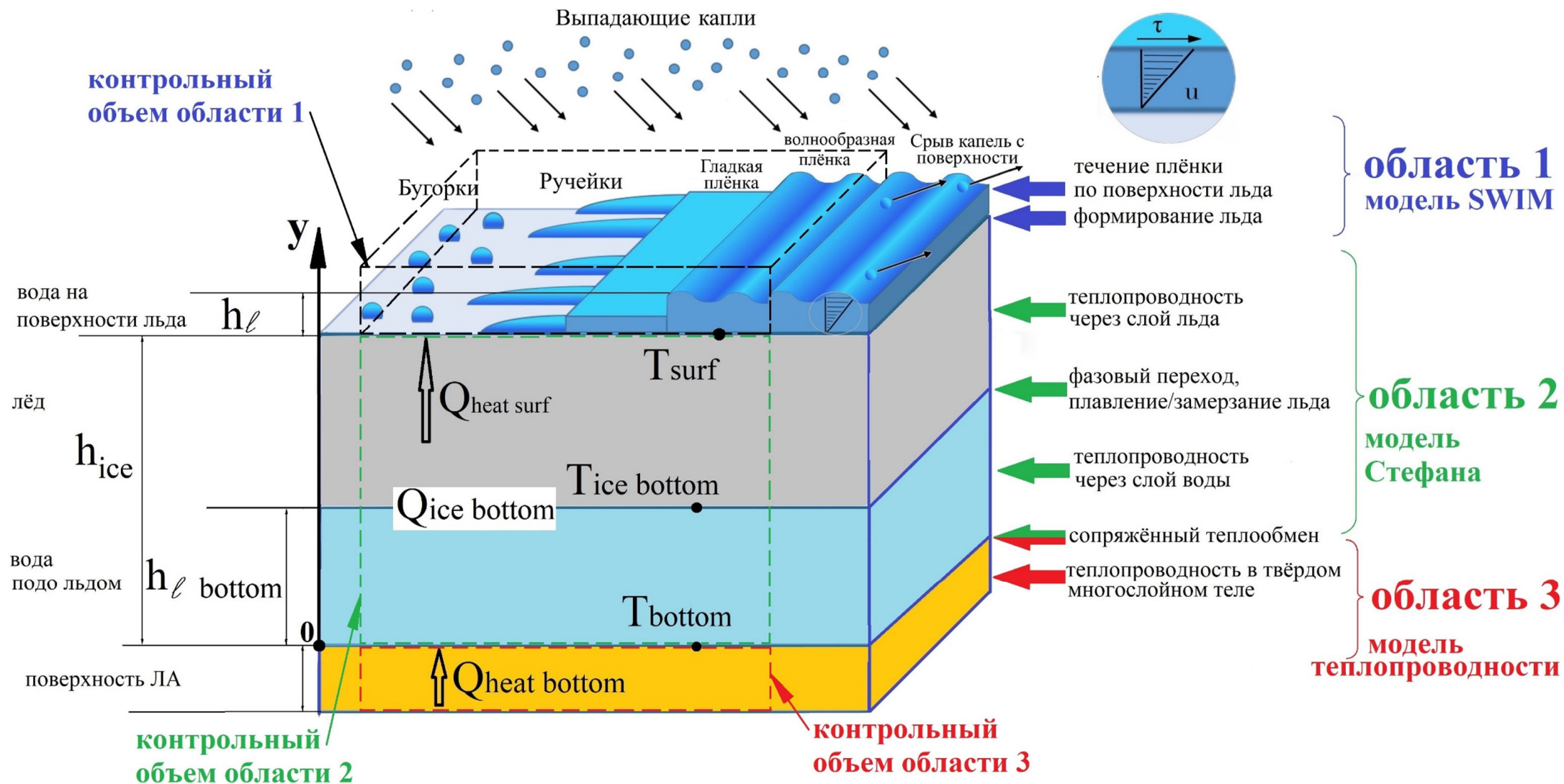
Режущая  
эрозия

## Учёт механических свойств льда и ледяной шуги

Модуль Юнга  $E$  и предел текучести при сжатии  $R_{el}$

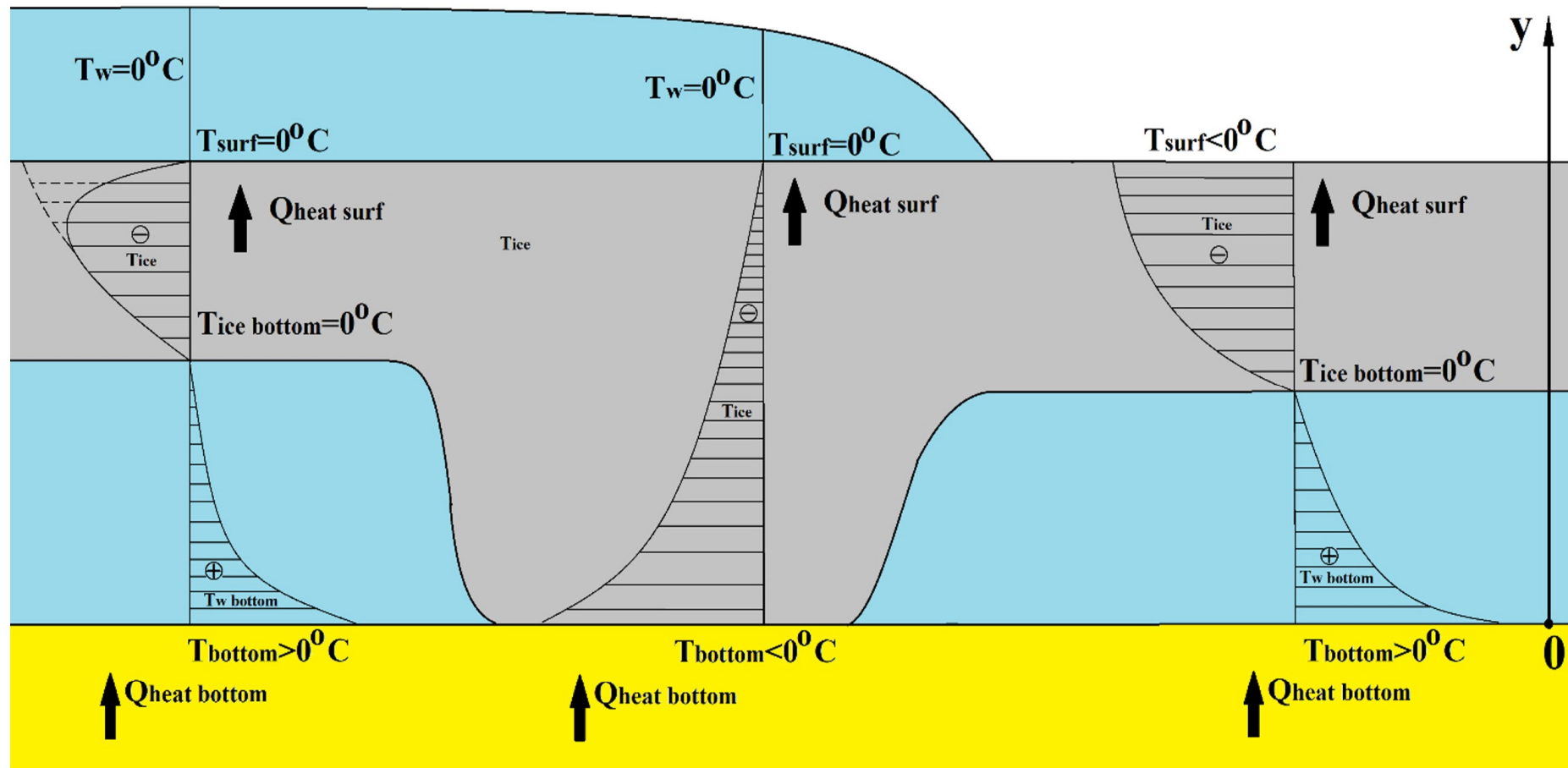
$$E_{\alpha_l} = E \cdot f(\alpha_l) \quad R_{el\ \alpha_l} = R_{el} \cdot f(\alpha_l)$$

# Термодинамическая модель роста льда в условиях ледяных кристаллов на сухой обогреваемой поверхности





# Моделирование нестационарных и переходных процессов внутри многослойной структуры ледяного нараста



толщина водяной плёнки  $h_w > 0$ ,

толщина слоя льда  $h_{ice} > 0$ ,

высота слоя подлёдной воды  $h_{w\_bottom} > 0$

$h_w > 0$

$h_{ice} > 0$

$h_{w\_bottom} = 0$

$h_w = 0$

$h_{ice} > 0$

$h_{w\_bottom} > 0$

# Алгоритм построения формы льда (метод коррекции нормалей)

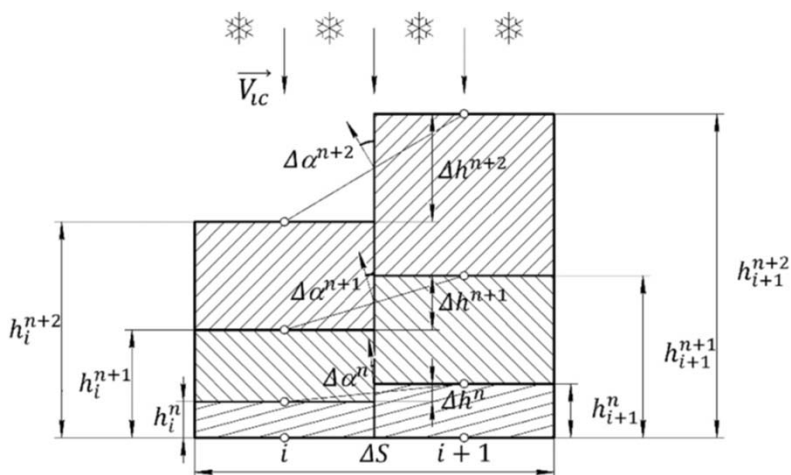
## Метод коррекции нормалей

Особенность формирования льда в условиях ЛК и смеси фаз:

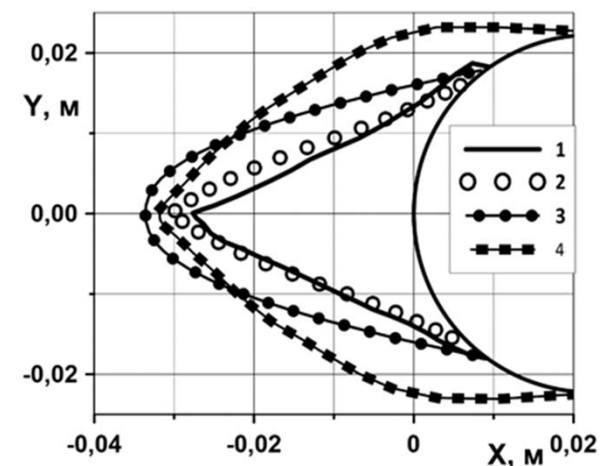
- образование остроконечных форм льда,
- быстрое изменение формы нароста,
- сглаживание острых форм при перестроении сеток приводит к нереальным ледяным наростам.

Решение проблемы:

- применение метода корректировки нормалей.



- 1 - эксперимент\*,
- 2 - настоящая модель,
- 3 - расч. без коррекции нормалей,
- 4 - IGLOO2D \*\*

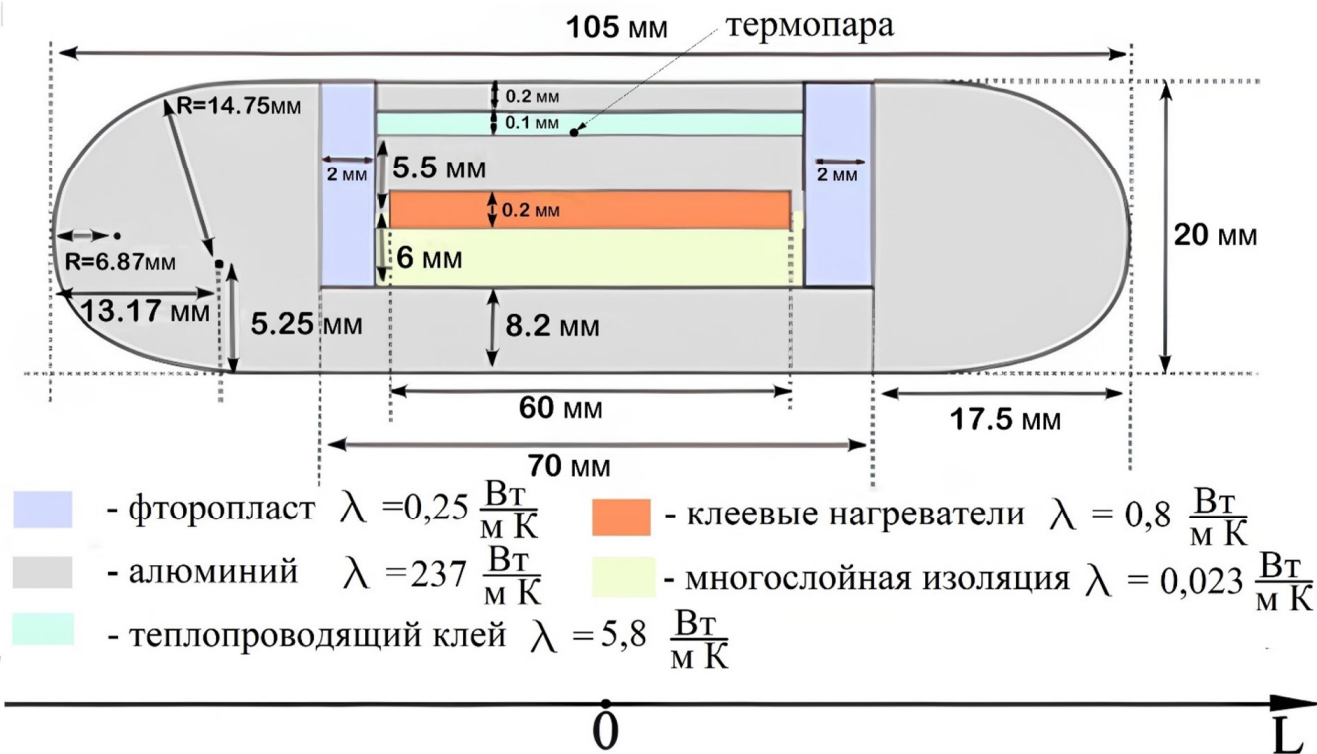


Режим №	Р Па	Т С	V м/с	MMD мкм	TWC г/м³	LWC TWC %	Продолжительность с
67	34500	11,4	84,55	130	6	0,14	375

## **Валидация модели роста льда в условиях сухих кристаллов на сухой обогреваемой поверхности**



# Валидация модели роста льда в условиях сухих кристаллов на сухой обогреваемой поверхности

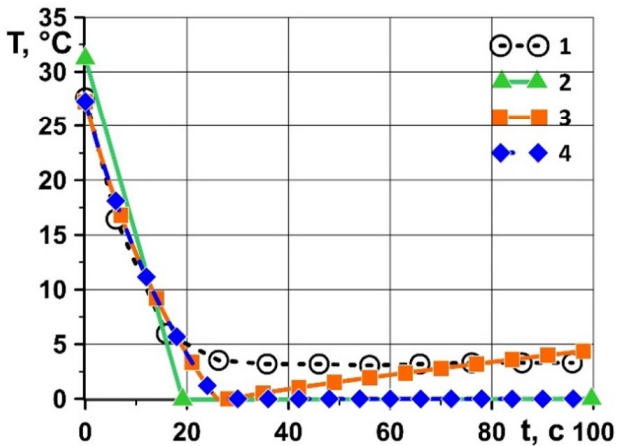


## Условия испытаний

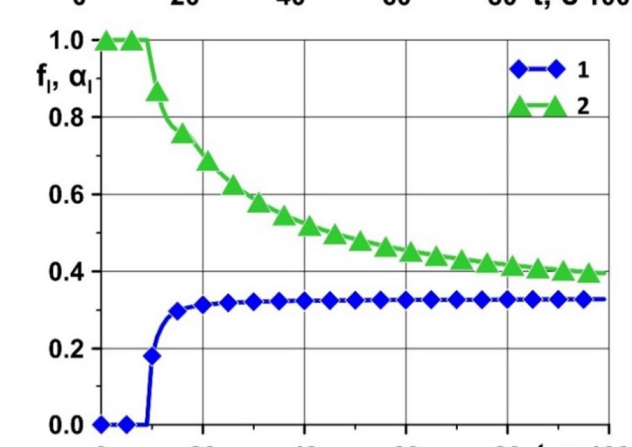
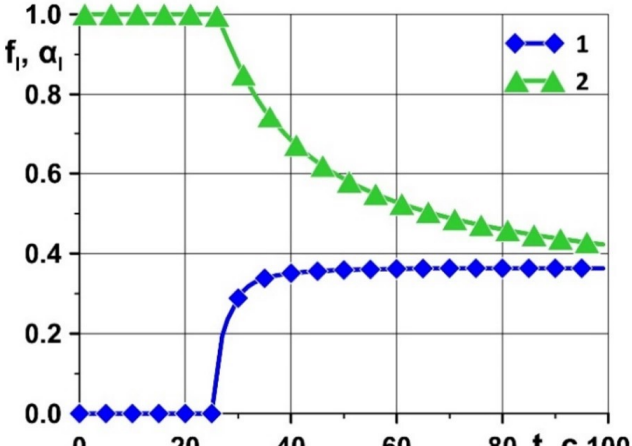
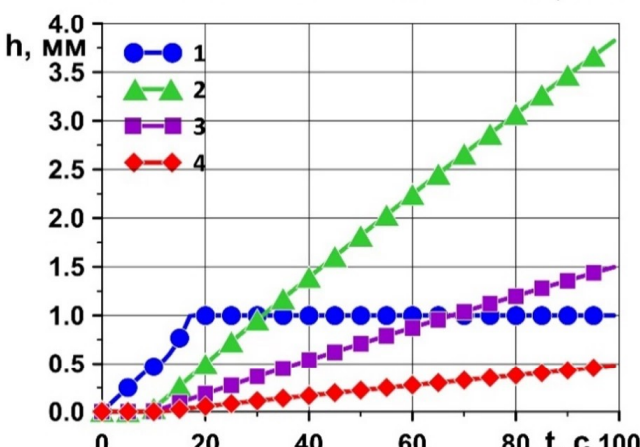
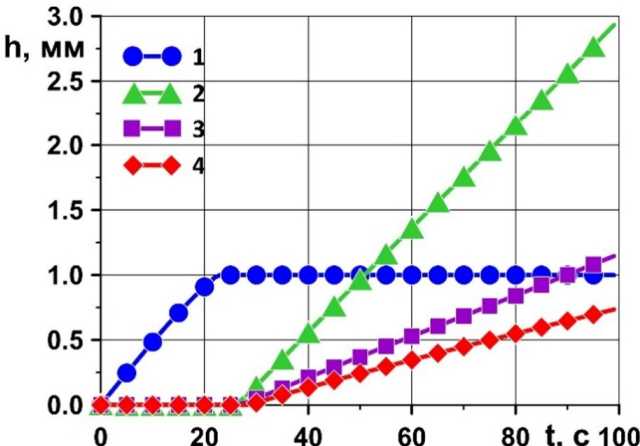
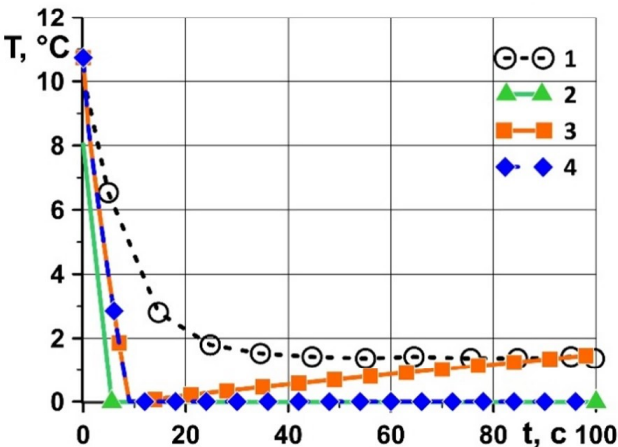
№ режима	U м/с	T °C	P Па	IWC г/м³	LWC г/м³	MMD мкм	$q_v$ объёмное тепловыделение Вт/м³
4	40	-5	101325	5	0	79	23009664
28	40	-10	101325	5	0	79	11504832

# Валидация модели роста льда в условиях сухих кристаллов на сухой обогреваемой поверхности

Режим 4



Режим 28



Температура поверхности модели: 1 – эксперимент, 2 - расчёт из статьи, 3 - предлагаемая модель, 4 – температура поверхности льда

толщин плёнок: 1 – воды на льду, 2 – льда, 3 – аккумулярованной воды, 4 – воды подо льдом

Расчёт по предлагаемой модели

1 –массовая и 2 – объёмная доля жидкости в шуге

# Валидация модели роста льда в условиях сухих кристаллов на сухой обогреваемой поверхности

Объект в конце испытания

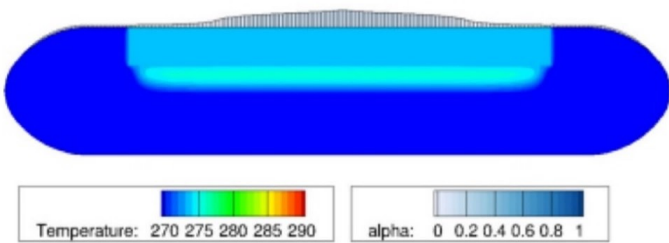
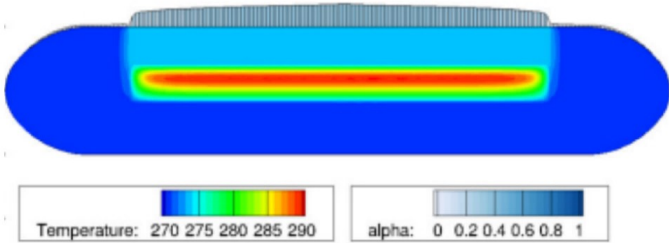
Режим 4



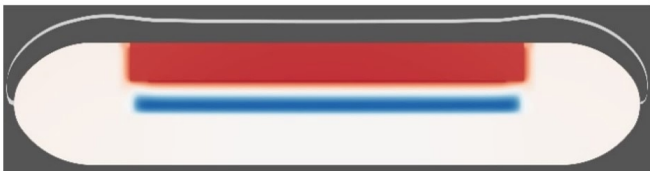
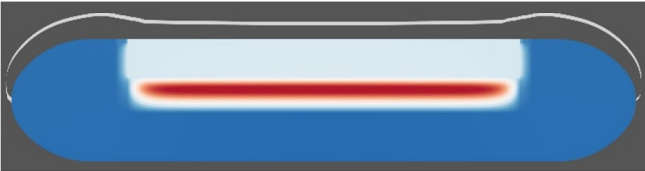
Режим 28



Расчёт нарастания льда по методике из статьи



Расчёт нарастания льда по предлагаемой методике ПМ Кристалл

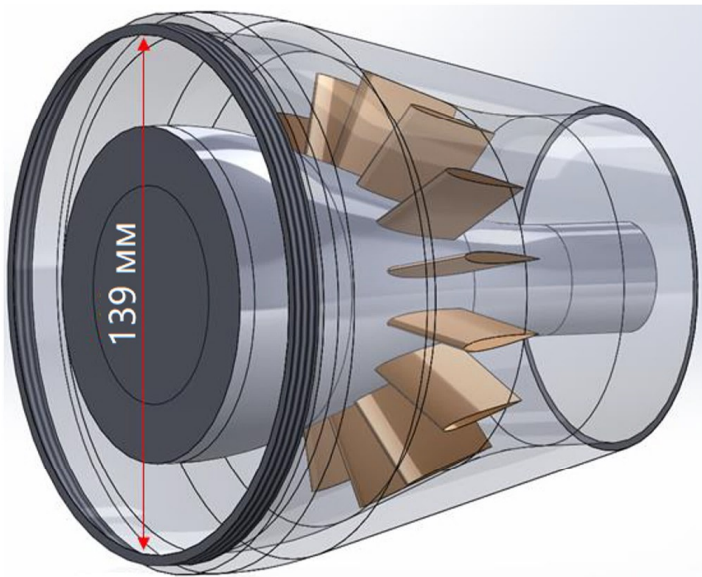




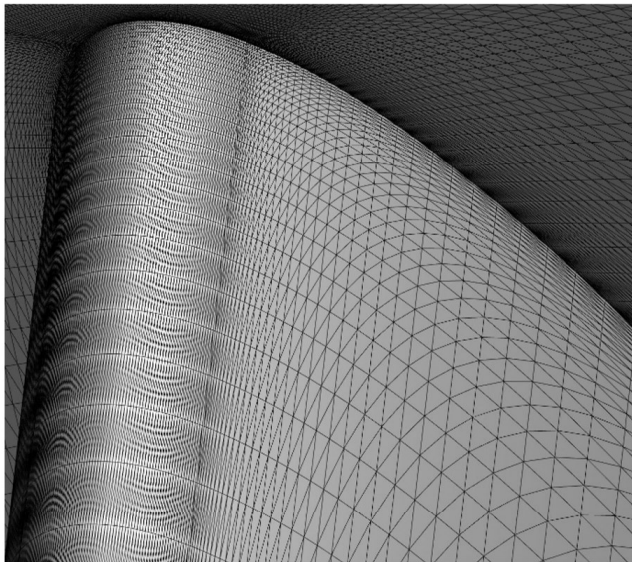
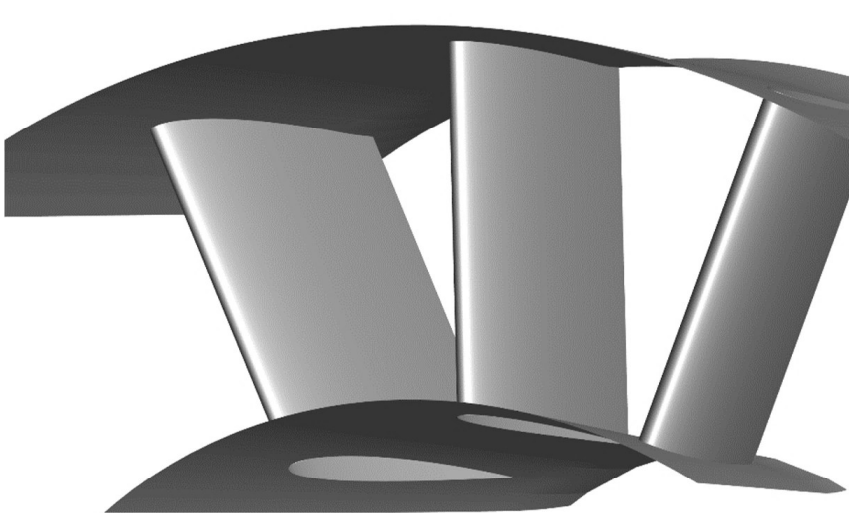
## Валидация модели роста льда на модели компрессора

# Валидация модели роста льда на модели компрессора

Модель компрессора



Расчётная сетка



Условия испытаний

№ режи ма	Р Па	Т С	U м/с	MMD, мкм	TWC г/м³	Степень подплавления, %	Продолжи тельность с	Скор. рост. мм/с	суро вость
131	36300	3.42	90.73	38	3.4	0.422	20	0.08	0.5
135	37010	2.36	99.24	38	3.45	0.202	30	0.173	3
136	36380	0.06	92.24	38	3.4	0.018	120	0.117	2
137	36620	-1.35	101.55	38	3.43	0.013	90	0.107	1

# Валидация модели роста льда на модели компрессора

Режим 131



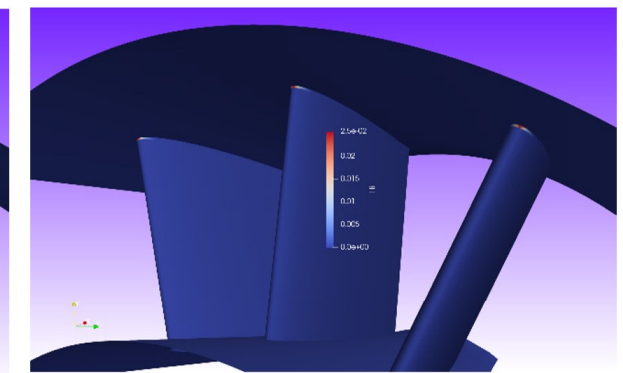
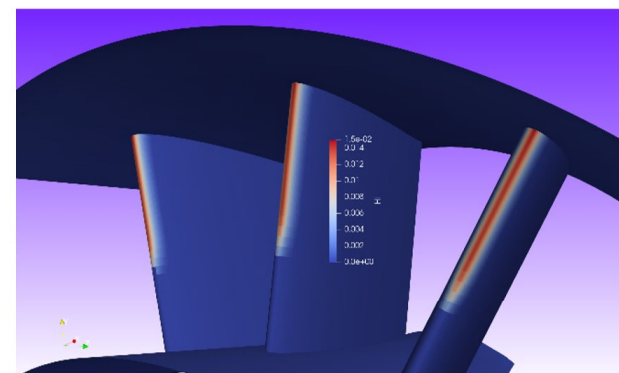
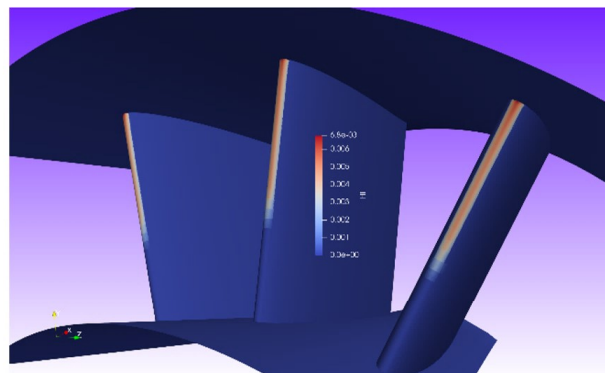
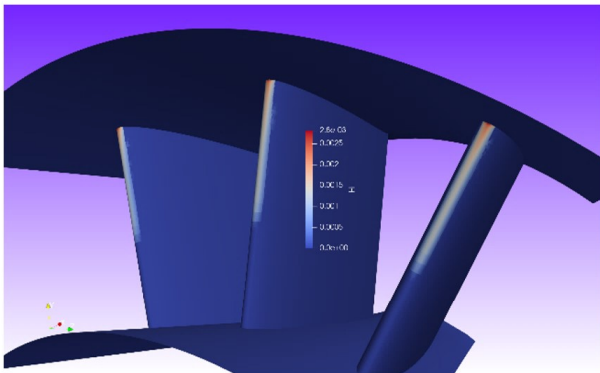
Режим 135



Режим 136



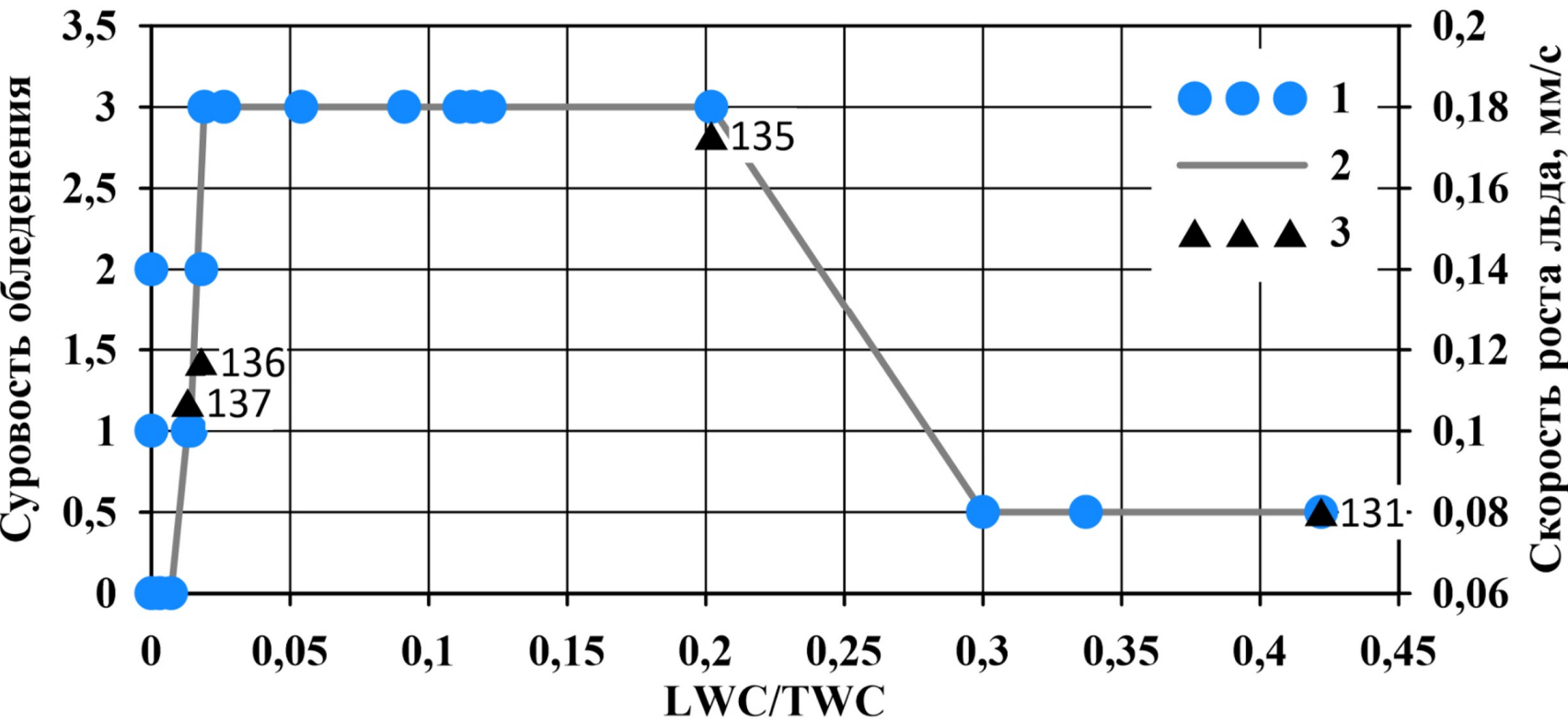
Режим 137





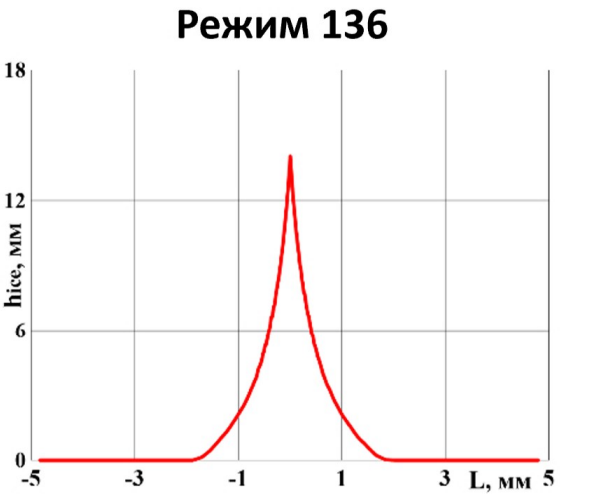
# Валидация модели роста льда на модели компрессора

Зависимость обледенения элементов компрессора от степени подплавления кристаллов LWC/TWC

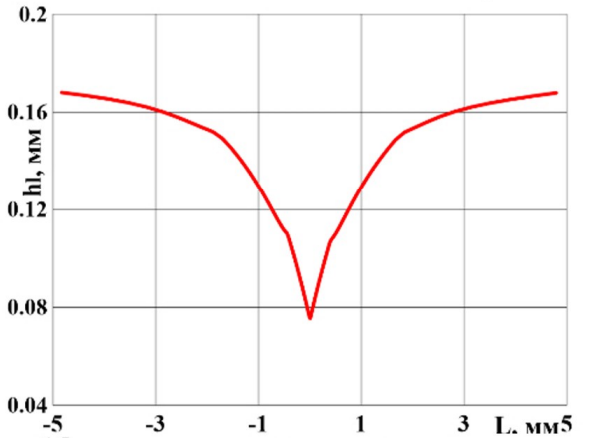


- 1 – эксперимент,
- 2 - аппроксимация,
- 3 - скорость роста льда на лопатке по предлагаемой модели

Толщина льда



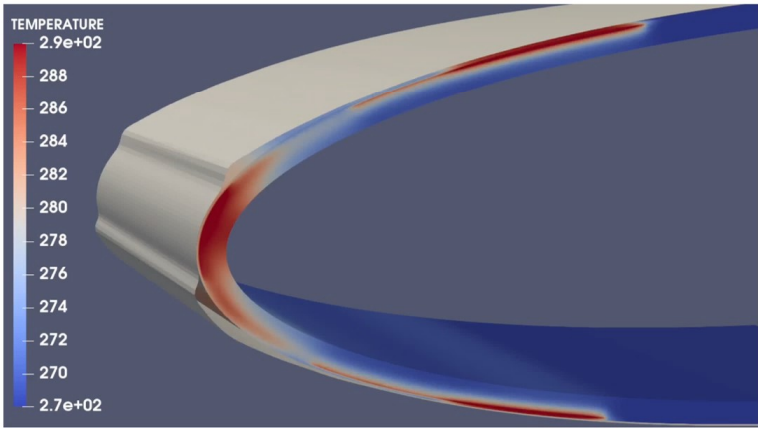
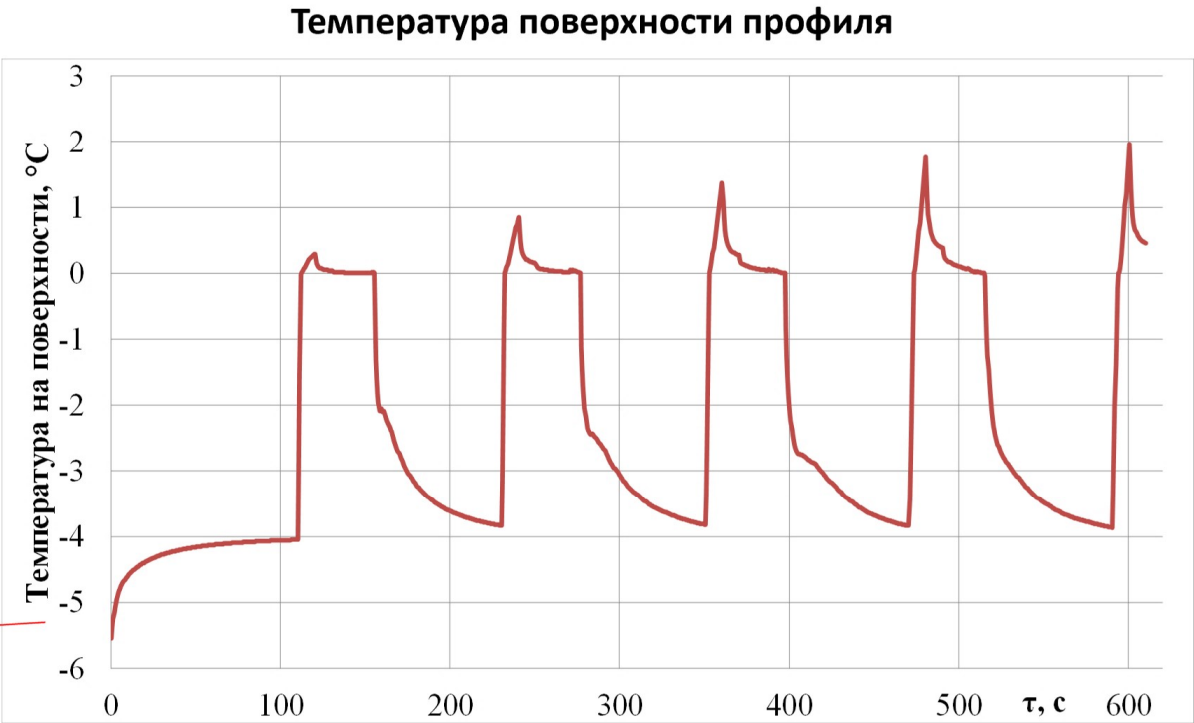
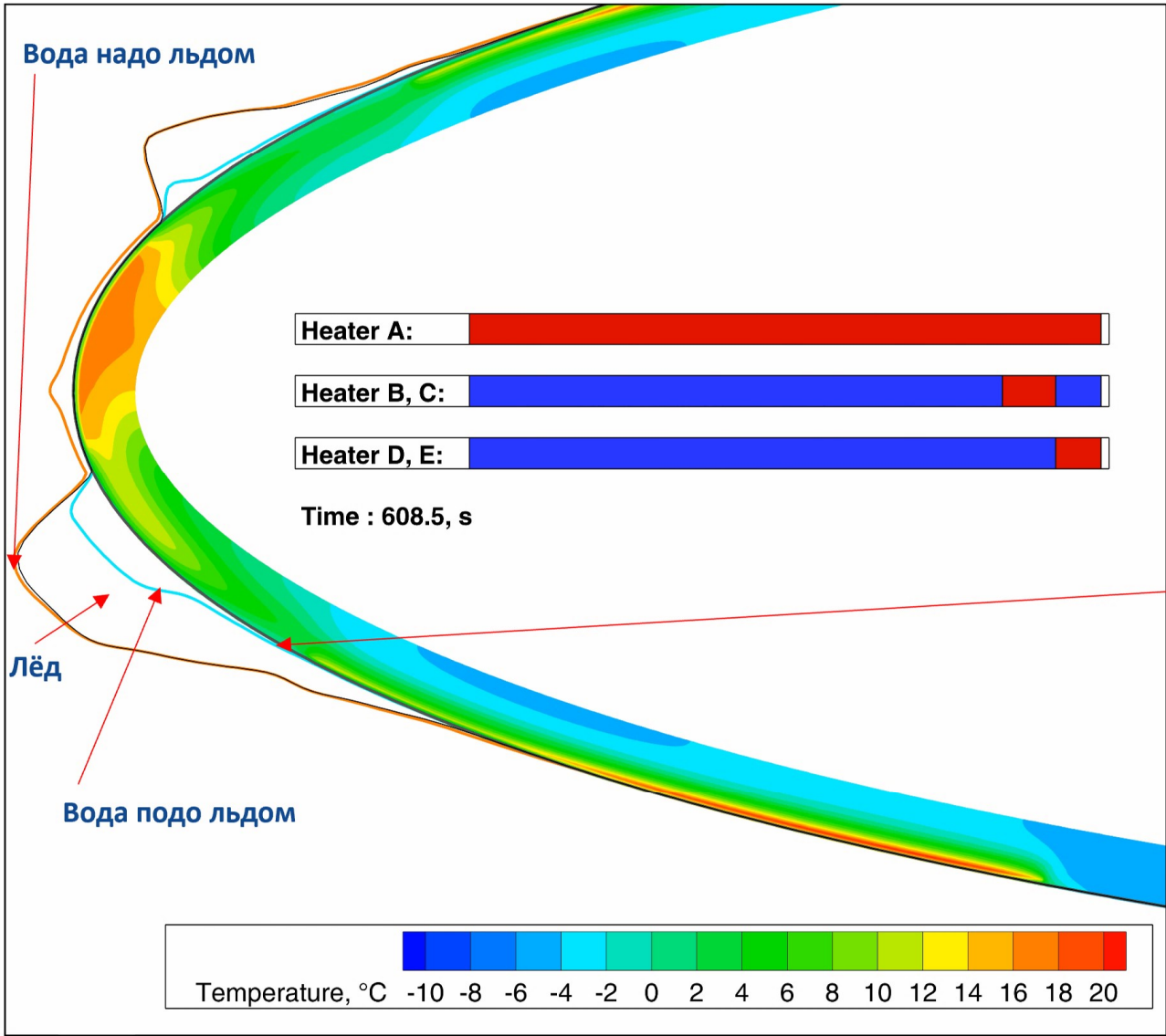
Толщина плёнки воды



Температура поверхности льда



## **Моделирование структуры льда при работе тепловых противообледенительных систем (ПОС)**





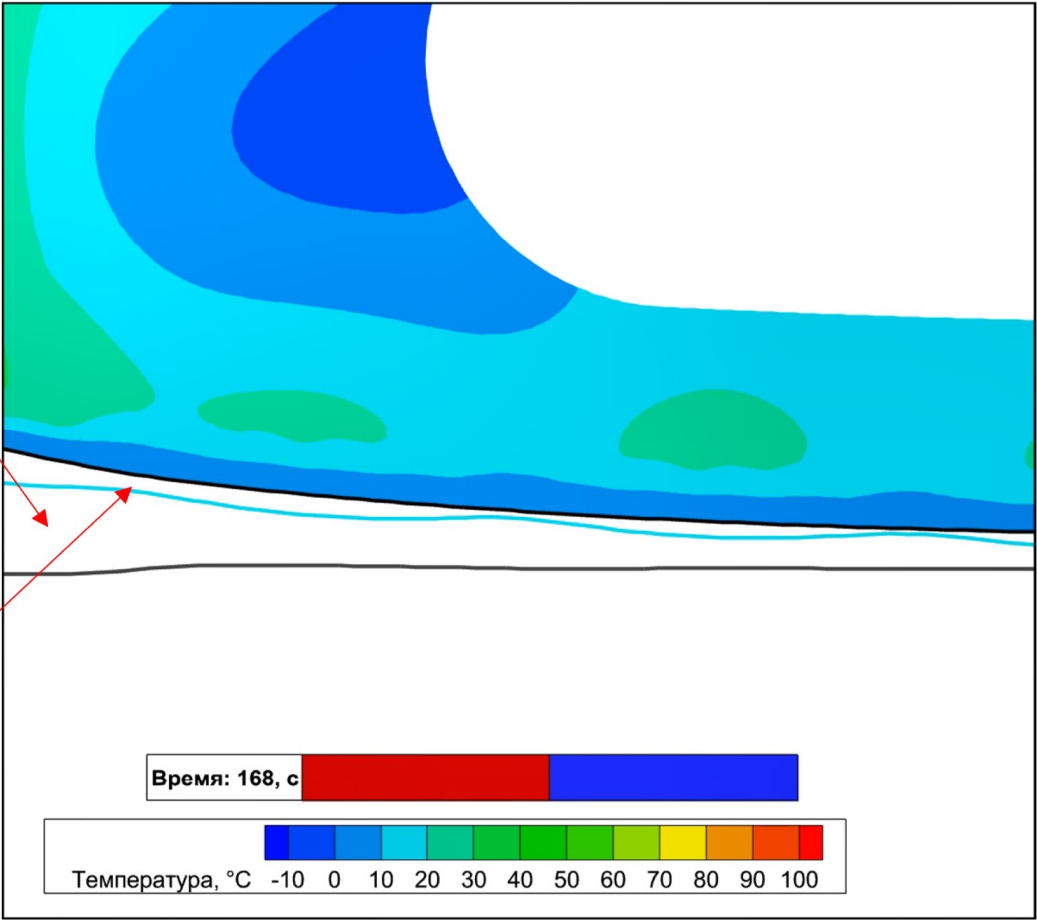
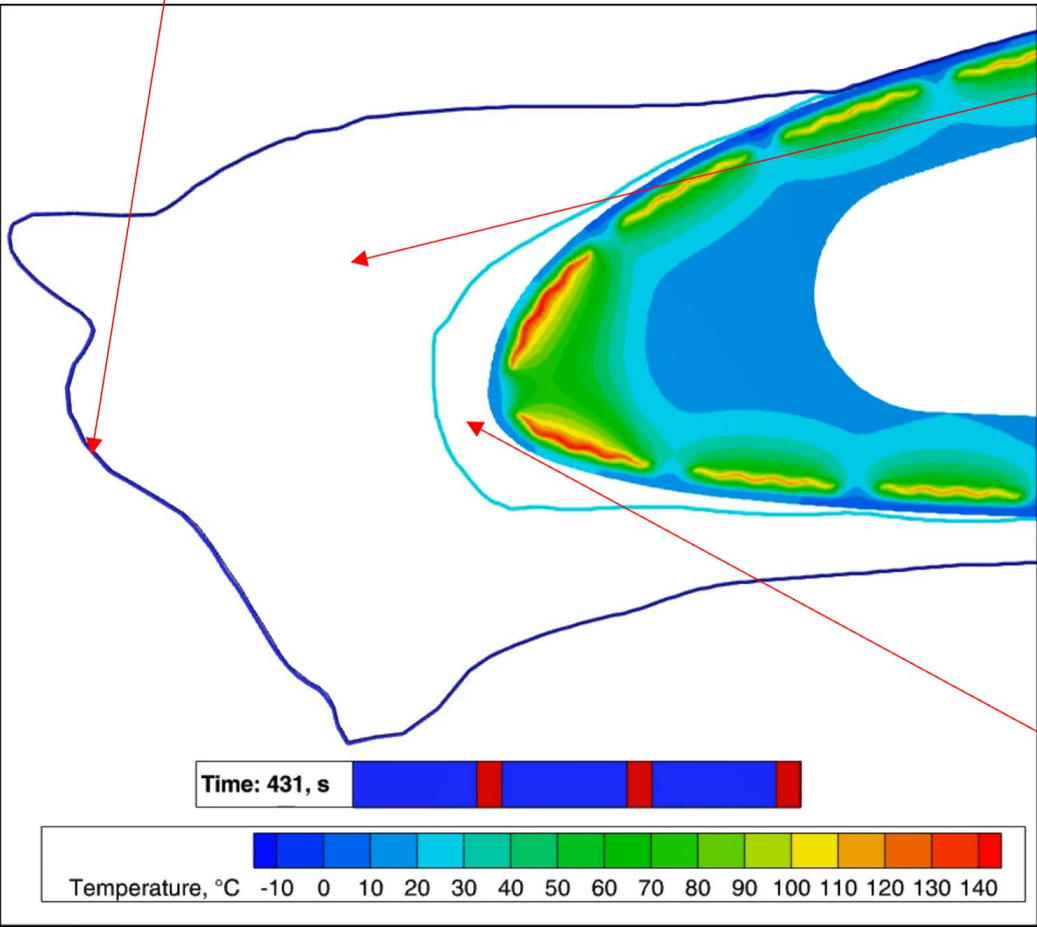
# Моделирование циклического нагрева при работе ЭПОС

-15°C

Вода надо льдом

Лёд

Вода подо льдом

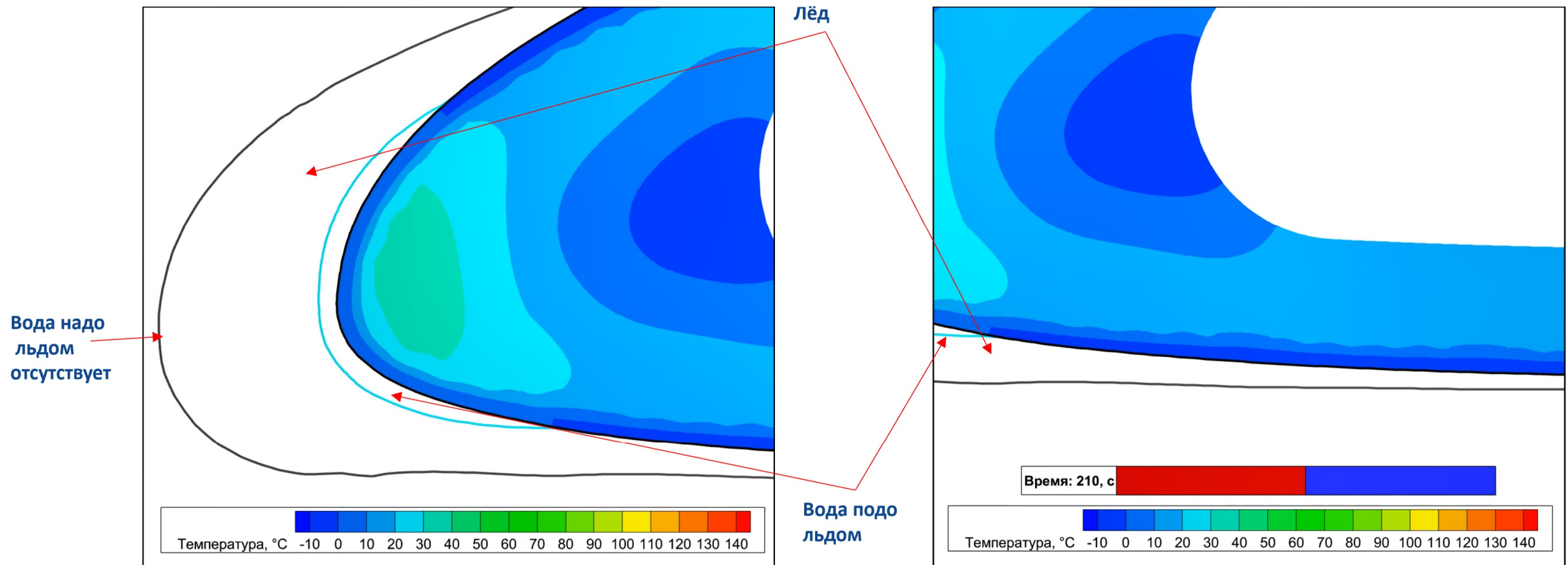


# Моделирование циклического нагрева при работе ЭПОС

-20°C

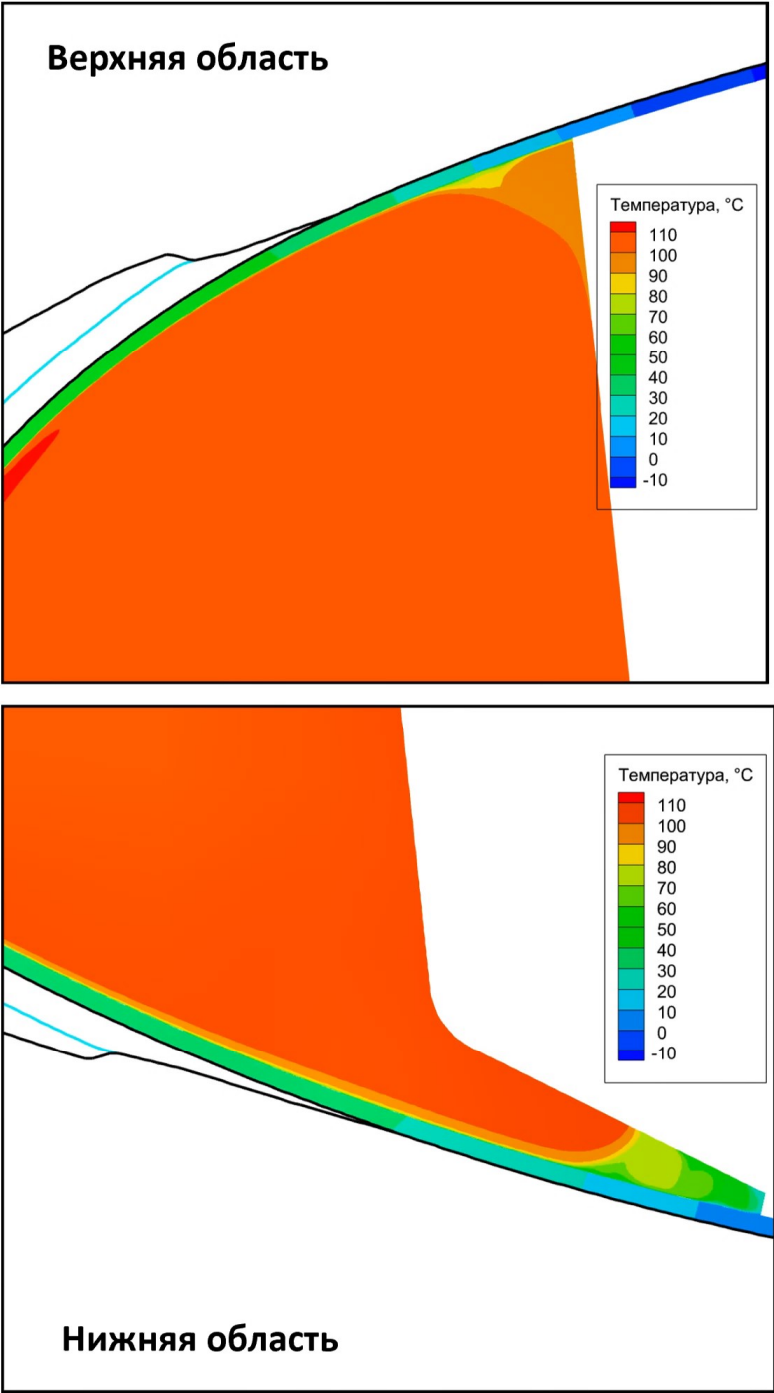
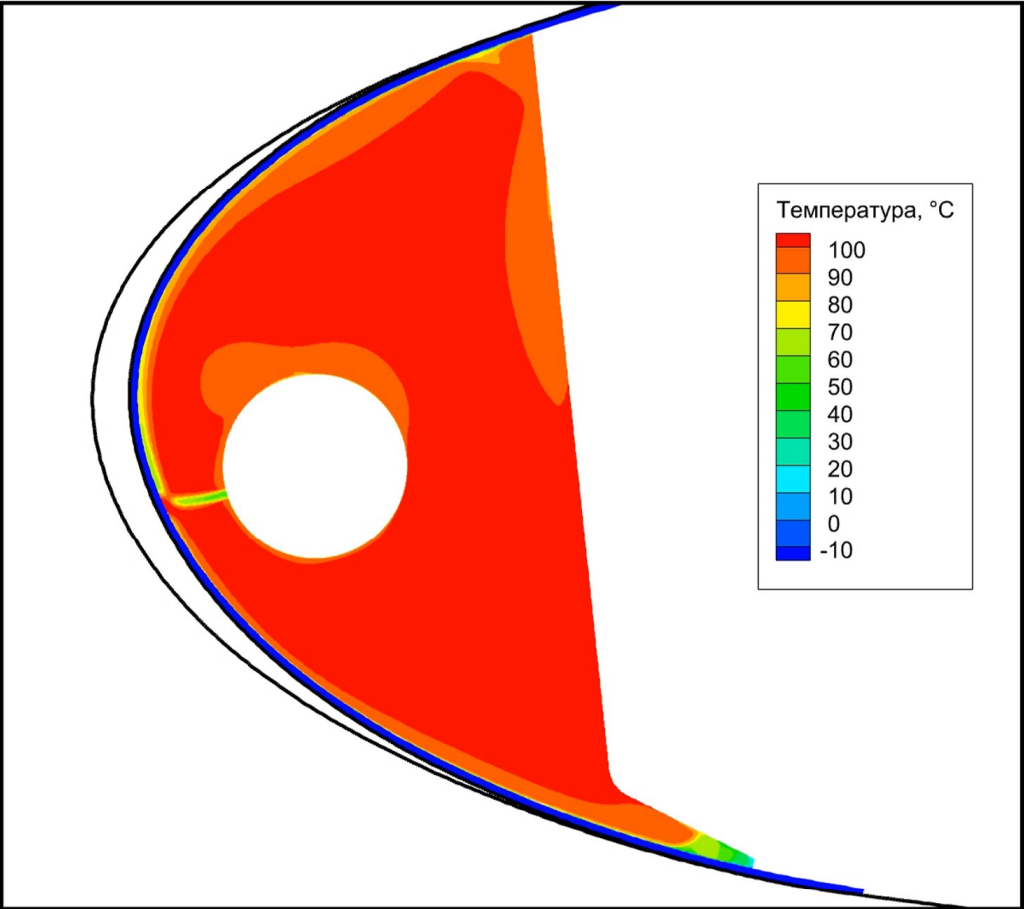
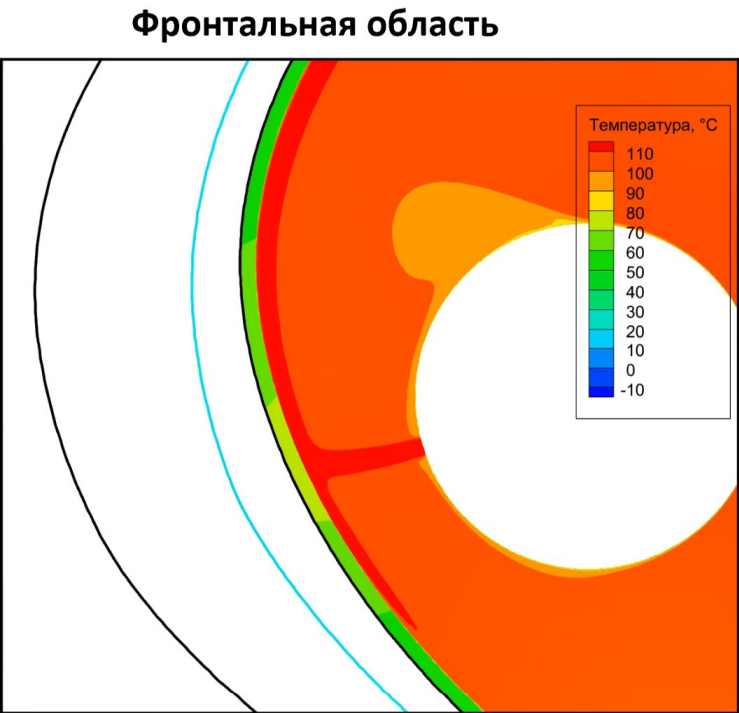
ЭТ ПОС на профиле NASA

Структура ледяного нароста при работе ЭПОС



# Моделирование работы воздушнотепловых ПОС

Модельная конструкция ВТ ПОС \*

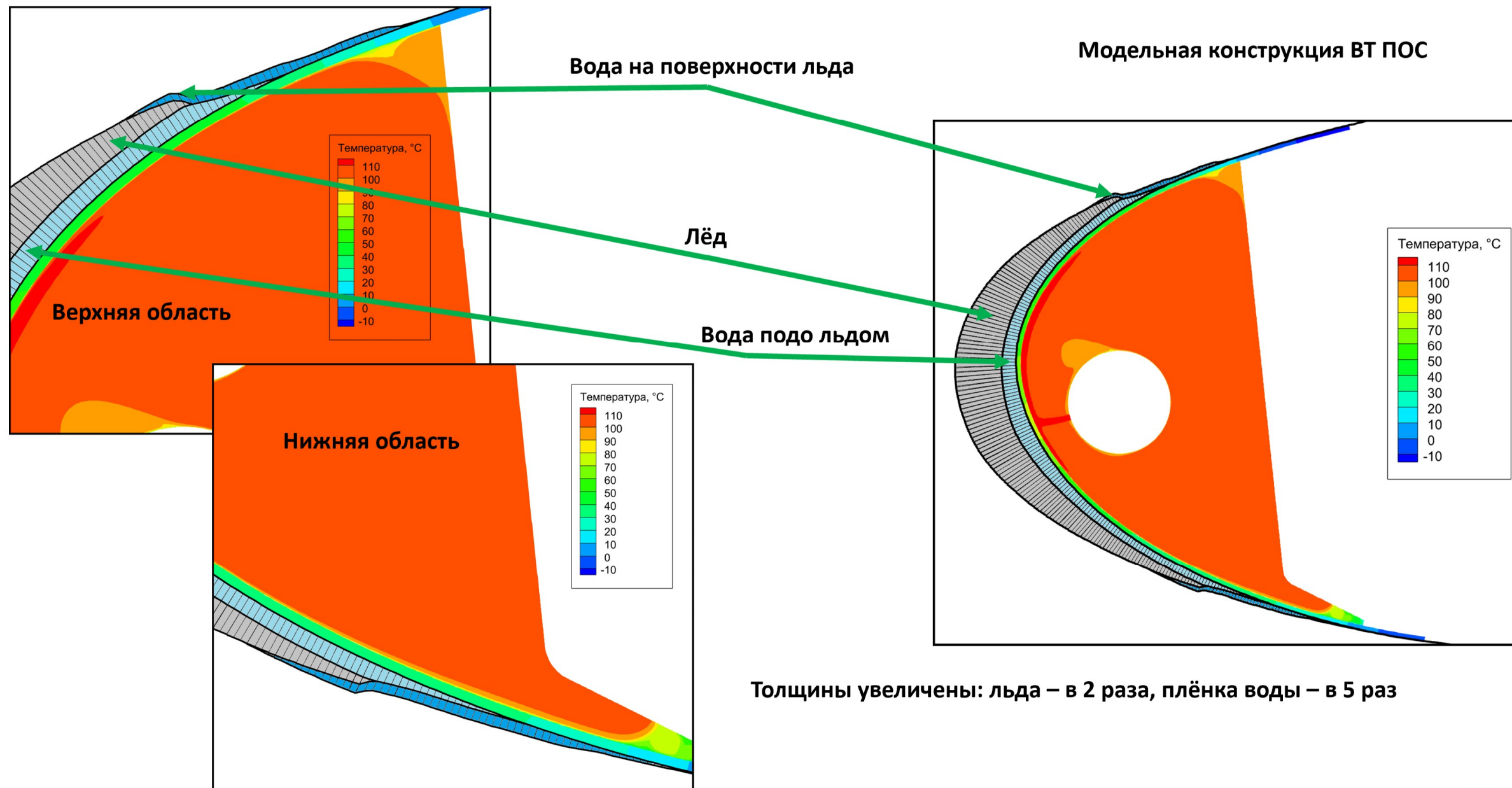


Скорость	Температура внешнего потока	Влажность	Давление	Температура греющего воздуха	продолжительность обледенения	продолжительность нагрева
м/с	С	г/м3	Па	С	с	с
152	-30	0,2	79540	70	480	15

Для наглядности, на видео увеличены толщины: льда – в 2 раза, плёнка воды – в 5 раз

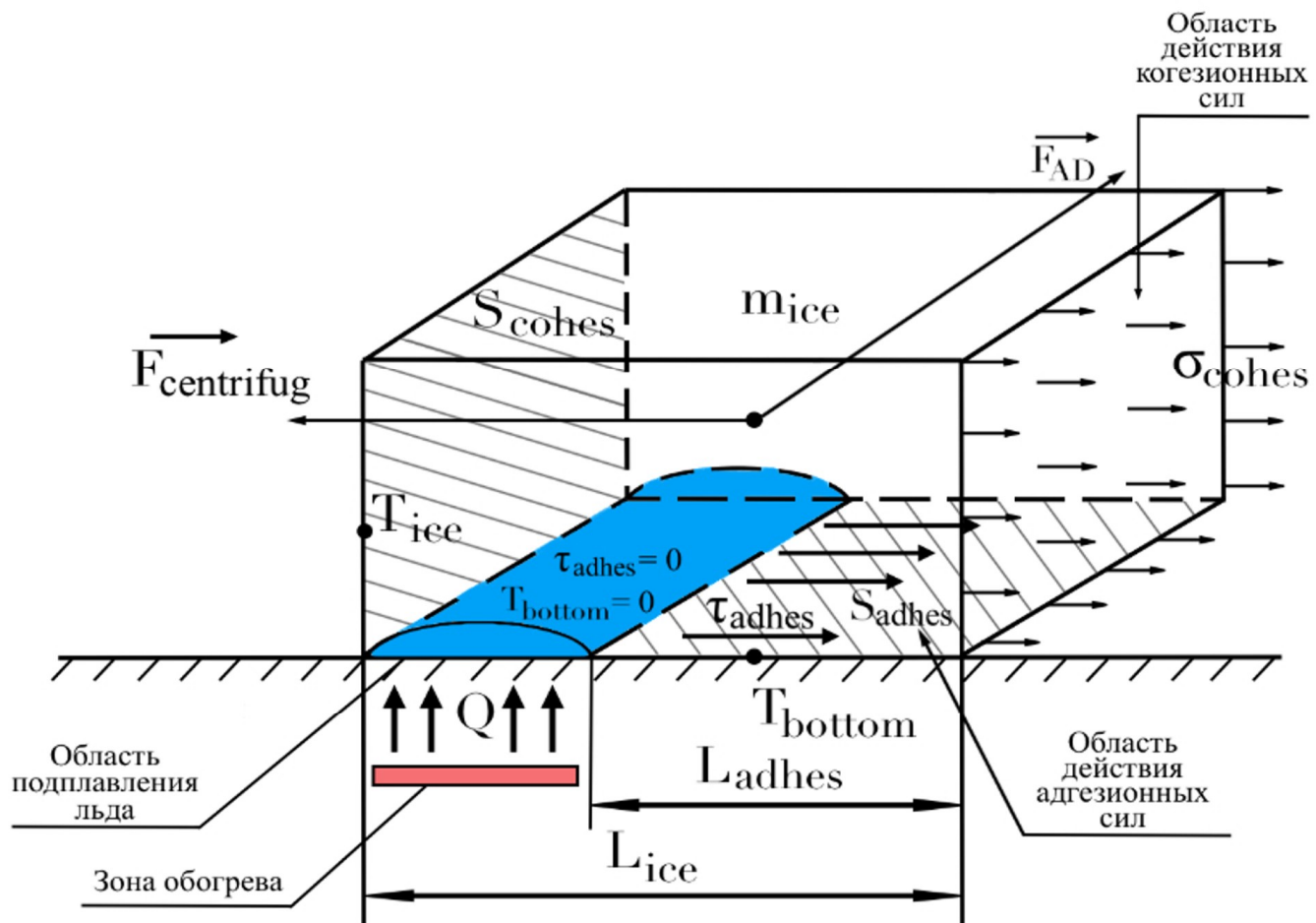
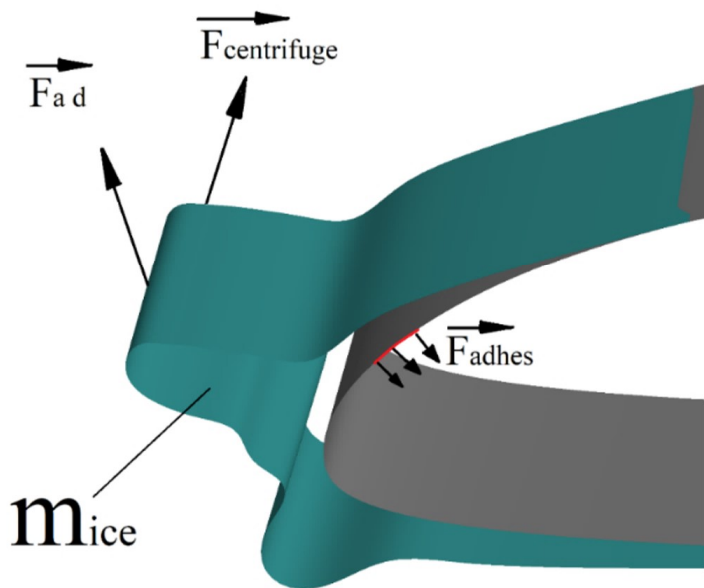


# Моделирование работы воздунотепловых ПОС



## Моделирование срыва льда

**при наличии и в отсутствии обогрева**



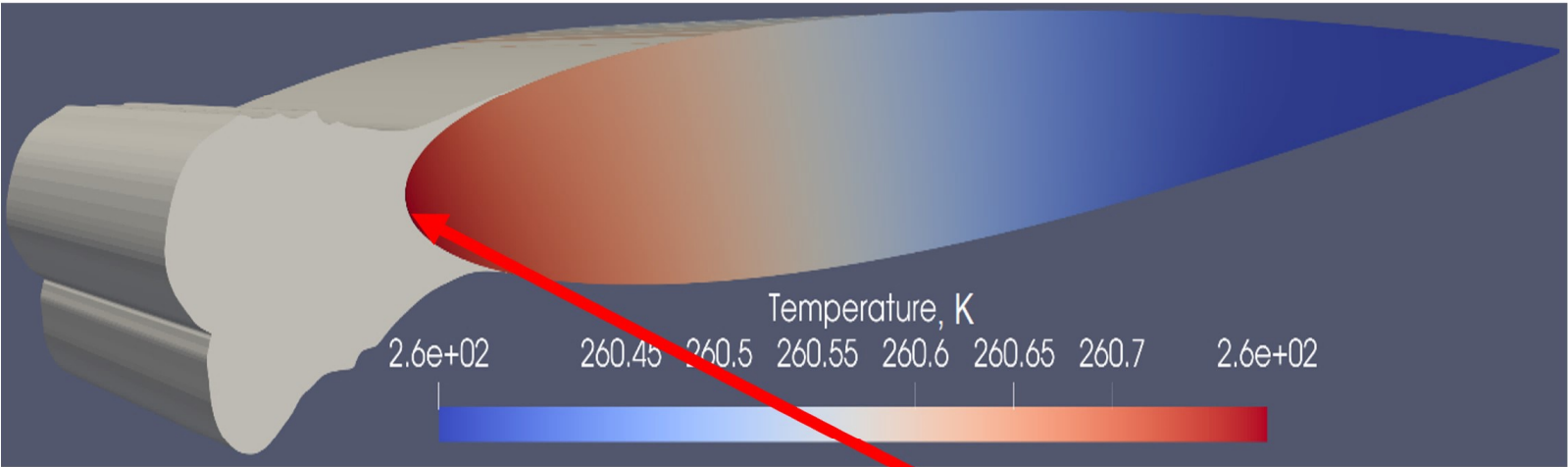


# Валидация модели срыва льда

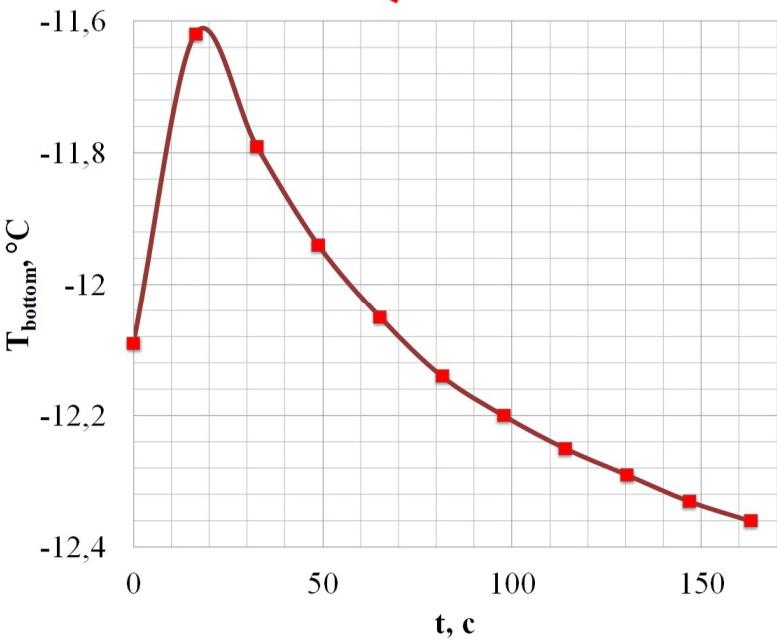
на результатах испытания профиля NASA 0012



Изменение теплового состояния модели в процессе обледенения,  $T_{\text{нв}} = -20^{\circ}\text{C}$



Параметр	Номер режима			
	1	2	3	4
Температура воздуха, $T$ , $^{\circ}\text{C}$	-5	-10	-15	-20
Давление воздуха, $P$ , Па	101325	101325	101325	101325
Скорость воздушного потока, $V$ , м/с	17	17	17	17
Содержание жидкой воды, LWC г/м <sup>3</sup>	0,842	0,842	0,842	0,842
Медианный размер капель, MVD, мкм	26,7	26,7	26,7	26,7
Время обледенения, $t$ , с	82	105	130	163
Угол атаки, $^{\circ}$	6	6	6	6

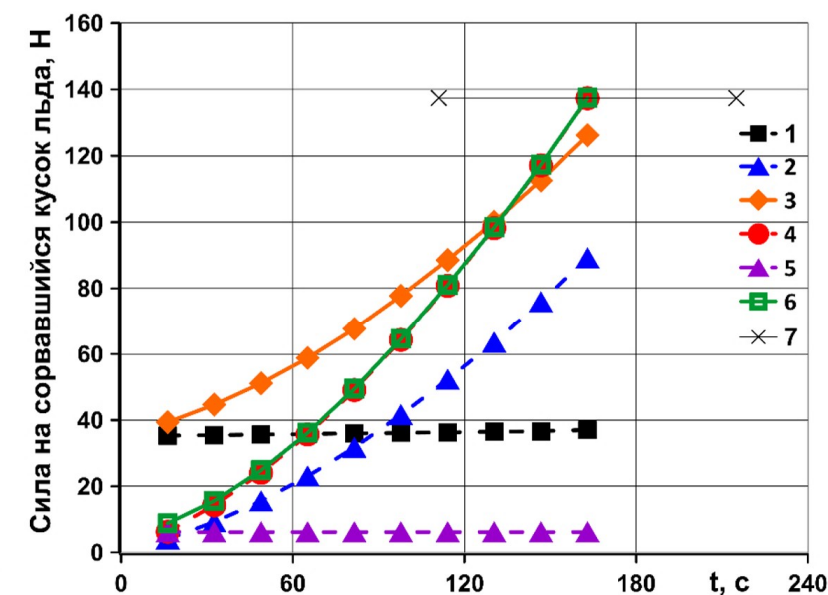
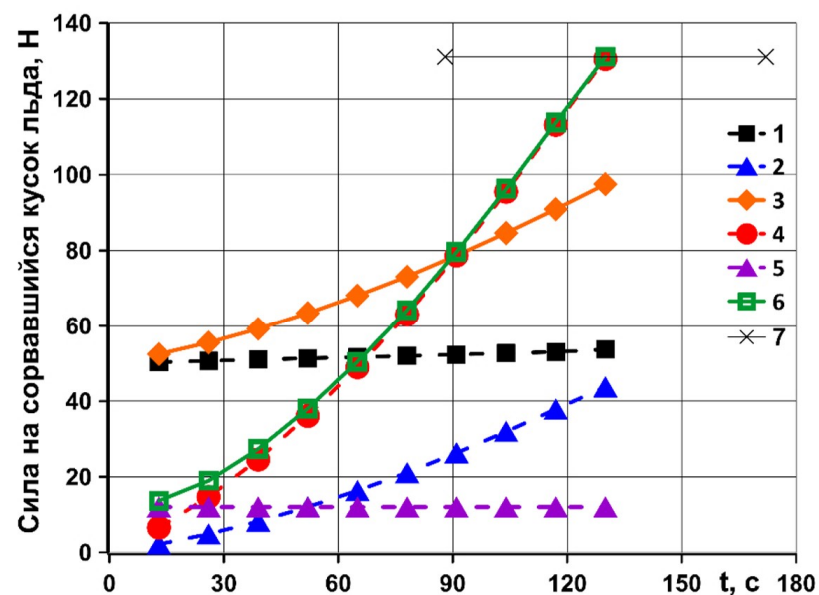
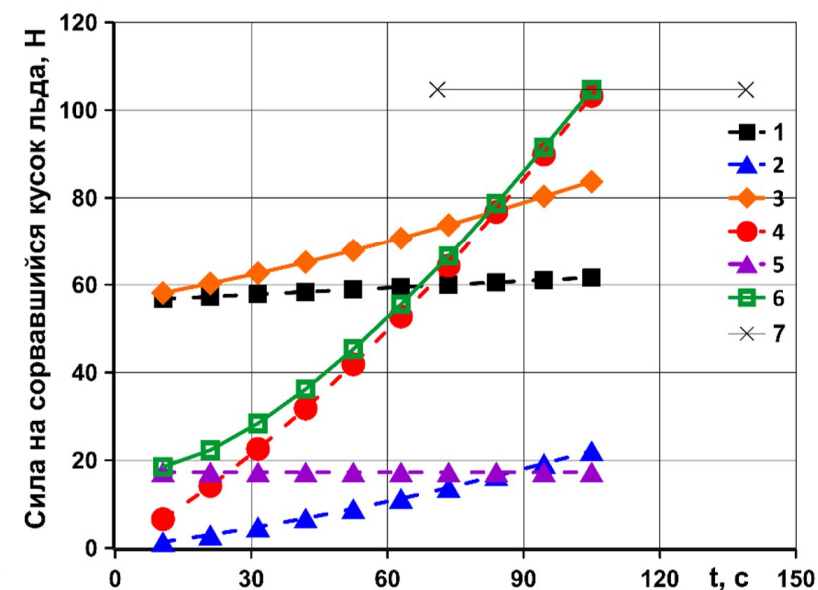
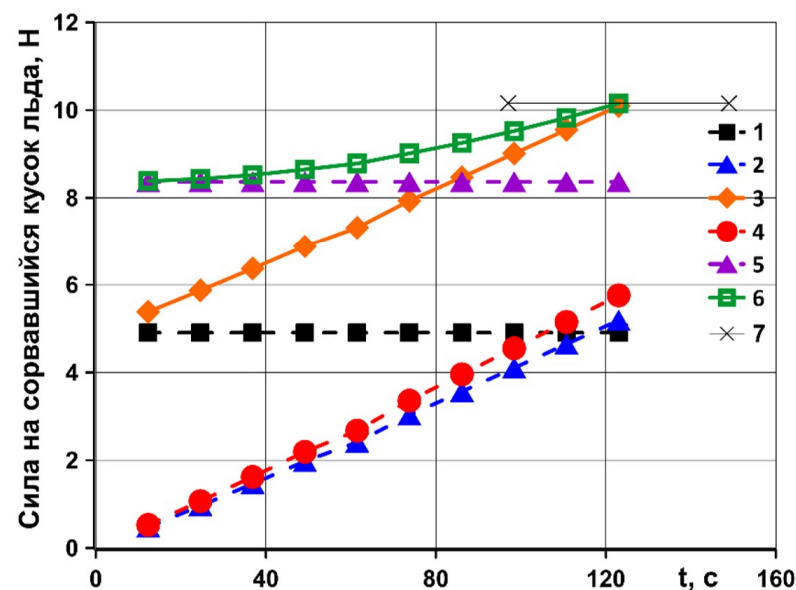


Изменение температуры поверхности профиля вблизи передней критической точки в процессе испытания

# Валидация модели срыва льда на результатах испытания профиля NASA 0012



Величины сил, действующих на ледяной нарост :  
1 – адгезионных, 2 – когезионных, 3 – суммарно адгезионных и когезионных, 4 – центробежных, 5 – аэродинамических, 6 – суммарно центробежных и аэродинамических, 7 – экспериментальная погрешность продолжительности испытания до срыва



## Новые функциональные возможности ПМ Кристалл

1. Доработана модель многослойной структуры ледяного налёта, позволяющая моделировать реальные физические процессы, протекающие в процессе формирования ледяного налёта на обогреваемой и необогреваемой поверхности.
2. Добавлена функциональная возможность формирования льда при воздействии сухих кристаллов на сухие обогреваемые поверхности.
3. Доработана модель, учитывающая не монотонность зависимости интенсивности роста льда от степени подплавления кристаллов.
4. Выполнена доработка программного модуля «Кристалл», позволяющая моделировать процесс удаления льда с обогреваемых и с необогреваемых поверхностей летательных аппаратов.
5. Выполнена верификация моделей с результатами расчёта по коммерческим кодам, а также валидация путём сравнения с имеющимися экспериментальными данными.