



24-я Международная конференция
«Авиация и космонавтика»

17–21 ноября 2025



Расчёт теплового потока для частично смоченной супергидрофобной поверхности

Скиданов Сергей Николаевич

Кандидат технических наук, доцент
кафедры 203

Жигулин Илья Евгеньевич

Начальник отдела самолетов
транспортной категории
Авиарегистр России



Введение

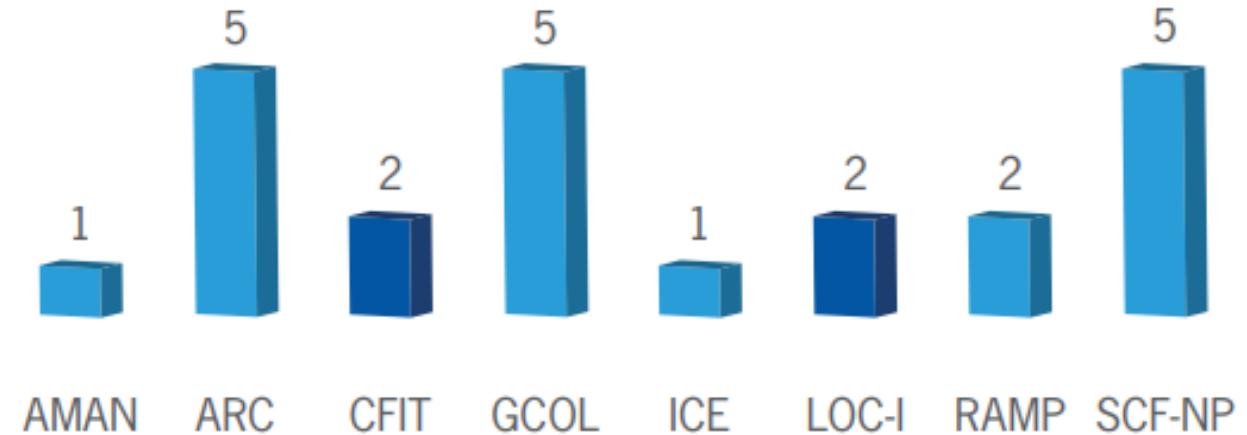
Исследования противобледенительных характеристик супергидрофонных покрытий на конструкции крыла является перспективным направлением для повышения эффективности защиты от обледенения и безопасности полетов современных ВС.

Актуальность темы исследования



Согласно статистике ICAO обледенение Icing (ICE) входит в десятку наиболее распространенных причин авиационных происшествий.

- Обледенением воздушного судна как в воздухе, земле.
- Обледенение лобового стекла
- Накопление льда на датчиках, антеннах и других внешних поверхностях.
- Накопления льда на воздухозаборнике и ВНА двигателя.
- Образование льда на тросовой проводке системы управления поворотом передней опоры шасси, на элементах управления и выпуска механизации крыла.
- Обледенение фильтров, закупорка льдом дренажей.



Научные школы и направления исследования



Предмет исследования	Организации	Научные школы
Проектирование и исследование противообледенительных и систем РФ	«Яковлев» «УЗГА», «ТАНТК им. Г.М. Бериева», «Туполев», «Ил» «Абрис», «Теплообменник», «АКС»	Левченко В.С. Скиданов С.Н., Шевяков В.И, Харихин А.В., Соболев Ю.Л.
Моделирование и испытания процессов обледенения в РФ	ЦИАМ ЦАГИ	Горячев А.В, Гребеньков С.А. Миллер А.Б, Амелюшкин И.М.
Проектирование противообледенительных зарубежом	Sonaca, CAV Ice Protection, Inc Aerospace Systems and Components HydraElectric, Innovative aerosystems, Rosemount	(Бельгия) (Англия) (США)
Моделирование процессов обледенения зарубежом	DLR ONERA, NCR и CIRA NASA's Glenn Research Center Cranfield University	(Германия) (Франция) (Канада) (США) (Великобритания)

Цель и задачи исследования



Цель

Оценка противообледенительных характеристик для супергидрофобных покрытий, применяемых на аэродинамической конструкции

Задачи

- **Определение потребной мощности системы (внешняя задача)** для аэродинамической поверхности крыла с супергидрофобным покрытием.
- **Проведение испытаний** в аэрохолодильной трубе ЦАГИ ЭУ-1 для аэродинамической поверхности с применением супергидрофобных покрытий.
- **Оценка** эффективности работы противообледенительной системы с применением супергидрофобных покрытий для защиты от обледенения

Научная новизна и значимость исследования



- **Научная новизна.**

- 1) Проведены испытания в условиях искусственного обледенения, определенных в соответствии с Приложением С, АП-25 для супергидрофобных покрытий на авиационной конструкции;
- 2) Определен потребный состав и зоны защиты для аэродинамических образцов с нанесенным супергидрофобным покрытием и электротепловом способе защиты от обледения.

- **Практическая значимость исследования:**

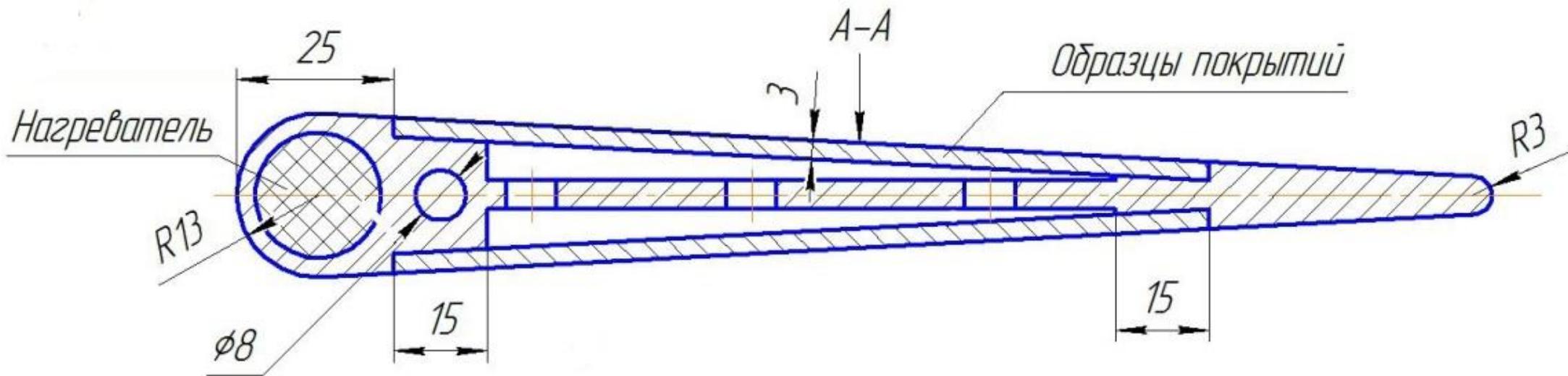
Повышение безопасности полета в условиях обледенения, при совместном применении противообледенительной системы с супергидрофобным покрытием и снижение энергопотребления противообледенительной системы на 50%.

Объект и предмет исследования



Объектом исследования является модель профиля крыла с нагреваемой передней кромкой и образцом супергидрофобного покрытия.

Предметом исследования является разработка и внедрение супергидрофобных покрытий на поверхностях авиационных конструкций с учетом принципов работы противообледенительных систем.



Модель профиля крыла с нагреваемой передней кромкой и образцом супергидрофобного покрытия

Расчёт теплового потока для частично смоченной супергидрофобной поверхности



Суммарная плотность потока на защищаемой от обледенения поверхности, для единицы поверхности определяется:

- Конвективным тепловым потоком q_α
- Тепловым потоком от скоростного нагрева за счет трения воздуха в пограничном слое q_1^*
- Потоком тепла, необходимым для испарения воды $q_{\beta 1}$

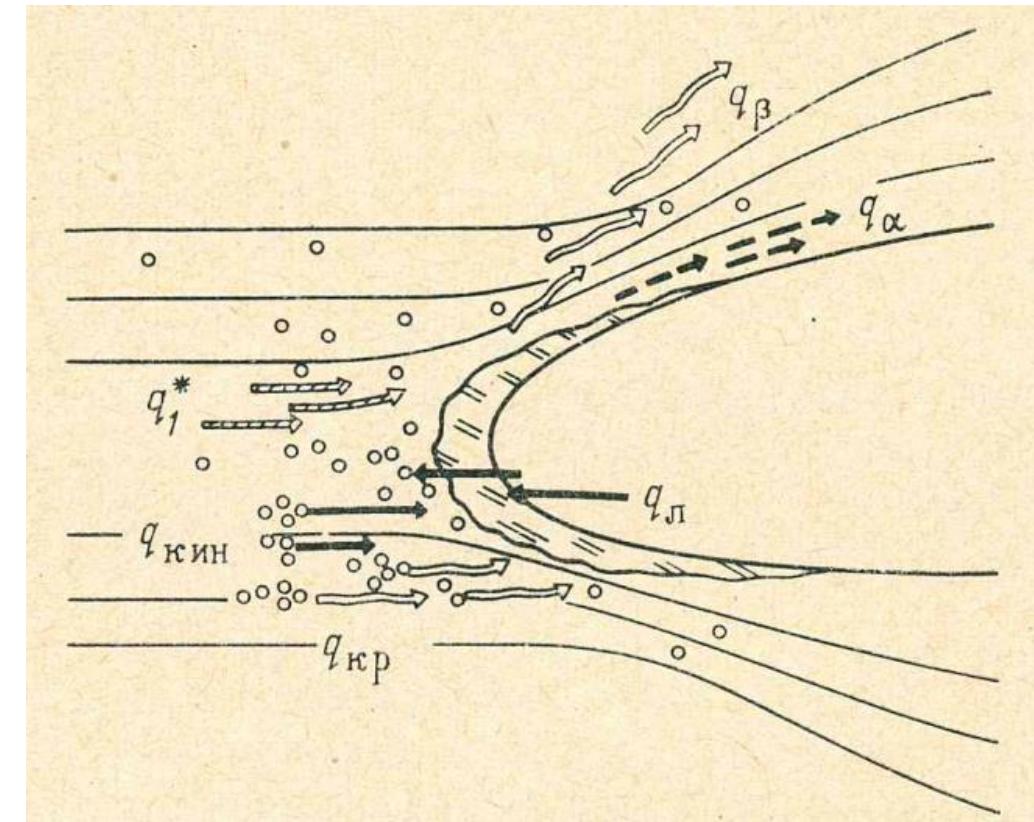


Схема тепловых потоков для защищаемой поверхности

Расчёт теплового потока для частично смоченной супергидрофобной поверхности



1. Необходимо определить величину теплового потока с единицы площади нагретой сухой поверхности передней кромки цилиндра.

- $q_a = \alpha(t_p - t^*_1)$.
- где t_p – заданная температура поверхности, t^*_1 – равновесная температура поверхности, α – местный коэффициент теплоотдачи.
- При турбулентном пограничном слое коэффициент теплоотдачи на цилиндрической передней кромке:
- $\alpha = 9,35 \cdot 10^{-4} \frac{(p_0 V_0)^{0,8}}{D^{0,2}}$

qa, кВт/м ²	29219	21080	29537	26999	31568	23800	17513	11355
X, мм	0	2	4	7	13	20	22	25

Расчёт теплового потока для частично смоченной супергидрофобной поверхности



2. Определяем плотность теплового потока для испарения с единицы влажной поверхности

- выражение для плотности теплового потока для влажной поверхности, для некоторого количества воды G_b :
- $q_{\beta 1} = G_b L_i$
- Плотность теплового потока без учета компенсации теплоты испарения:
- $q_{\beta 1} = \frac{0,622 \alpha L_i}{c_p} \frac{e_p - e_1}{p} \text{ Вт}/\text{м}^2$

3. Составим выражение ля учета тепла, возмещаемого за счет скоростного нагрева

- Плотность теплового потока с учетом компенсации теплоты испарения:
- $q_{\beta} = \frac{0,622 \alpha L_i}{c_p} \frac{e_p - e_{vl}^*}{p} \text{ Вт}/\text{м}^2$

В уравнении присутствует неизвестная e_{vl}^* - упругость насыщенного пара, соответствующая равновесной температуре влажной поверхности.

$q_{\beta 1}$ кВт/м ²	2978	1875	2335	2654	2811	2310	1874	1359
X, мм	0	2	4	7	13	20	22	24



Расчёт теплового потока для частично смоченной супергидрофобной поверхности

4. Суммарная плотность теплового потока, в пределах обогреваемой зоны определяется выражением

$$q_{\pi} = \alpha(t_{вл.п} - t_1^*)(1 + \frac{0,622\alpha L_i}{c_p} \frac{e_{\pi} - e_1^*}{t_{вл.п} - t_1^*})$$

qa, кВт/м ²	6167	3835	4717	5293	5533	4607	3786	2780
X, мм	0	2	4	7	13	20	22	25



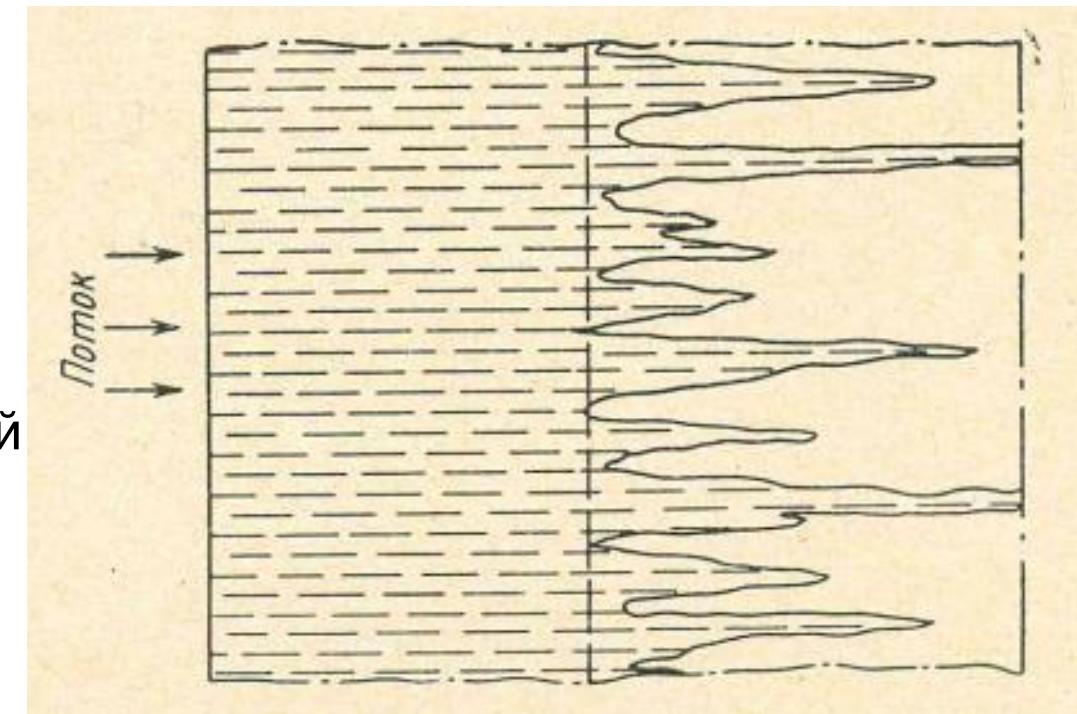
Расчёт теплового потока для частично смоченной супергидрофобной поверхности

5. Плотность теплового потока за пределами зоны улавливания, определяется выражением

$$q'_{\beta} = \alpha \xi_{вл} \frac{0,622 L_i}{c_p} \frac{e_{п} - e_{1вл}}{p} ^*$$

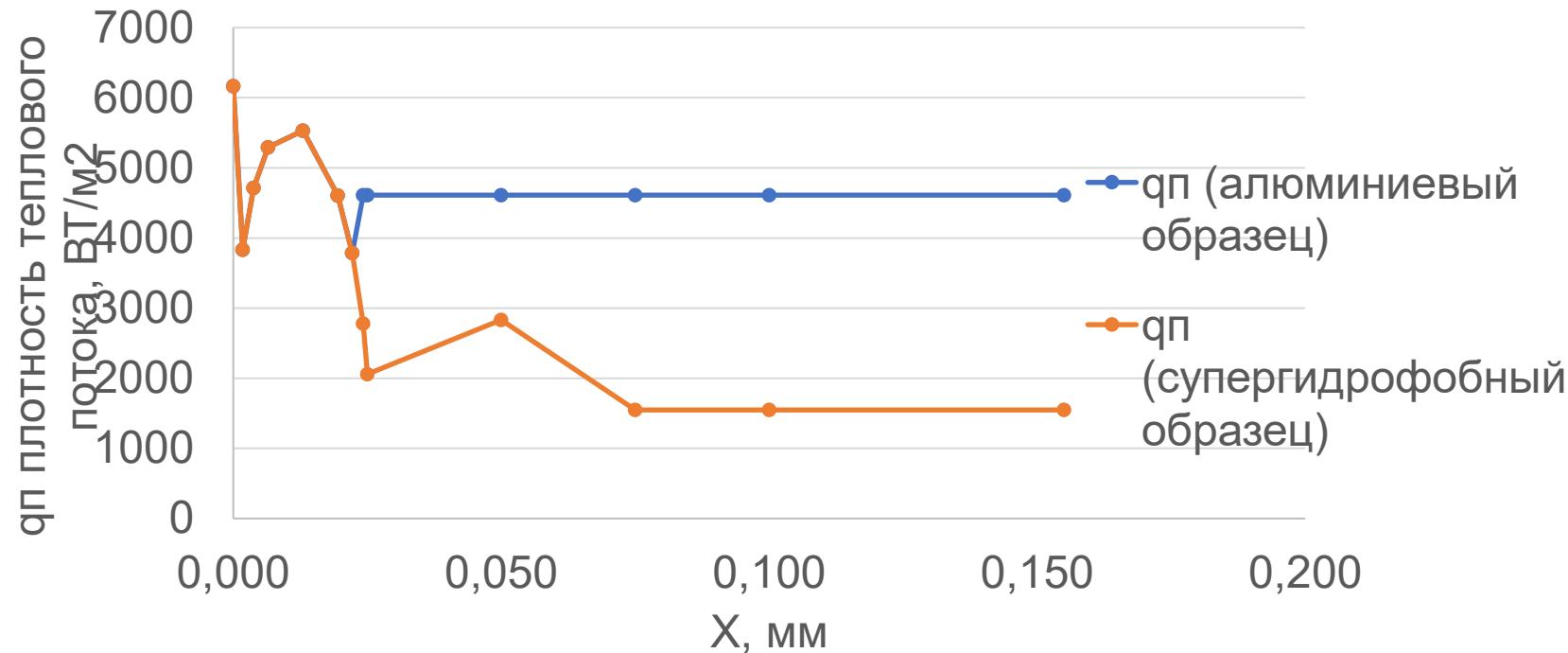
где $\xi_{вл}$ - коэффициент смачивания поверхности. Для алюминиевых образцов $\xi_{вл}$ варьируется от 0,3 до 0,2.

Для супергидрофобных поверхностей доля смоченной площади, как правило, имеет порядок $\xi_{вл} \approx 0.01 \div 0.05$.





Суммарная плотность теплового потока



6. Чтобы определить потребный расход горячего воздуха для обогрева поверхности следует рассчитать примерный тепловой поток, который система должна обеспечить.

$$Q_{\text{пос}} = \frac{q_{\text{ср}} F_3}{\eta}$$

Где $q_{\text{ср}}$ – среднее интегральное значение $q_{\text{п}}$ в зоне улавливания; F_3 – площадь защищаемой поверхности; η – КПД системы.

Результаты испытаний в аэроходильной установке ЭУ-1



Были испытаны образец плоской пластины из алюминия Д16 с супергидрофобным покрытием и контрольный образец без нанесения супергидрофобного покрытия. Пластины устанавливались в модель профиля крыла с нагреваемой цилиндрической передней кромкой. Ввиду особенностей испытываемого макета, образование льда на границе пластины не учитывалось.

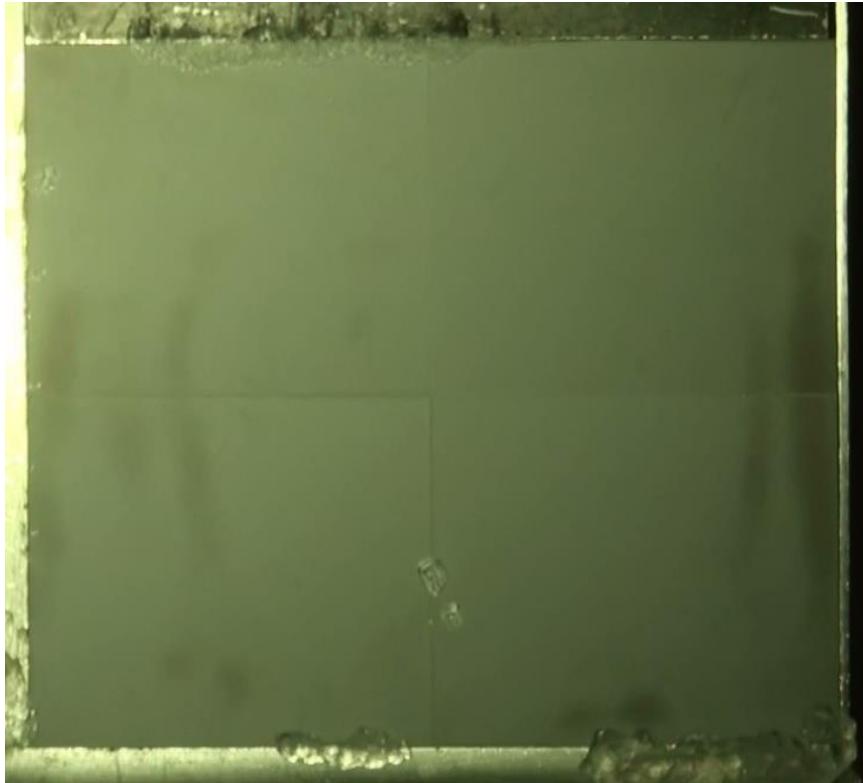
Параметры потока: $V=50 \text{ м/с}$, $t=-12\ldots-14^\circ\text{C}$ $W=1,2 \text{ г/м}^3$, $\alpha=0^\circ$.

Параметры нагрева передней кромки: $U=18,5 \text{ В}$, $N=159 \text{ Вт}$ и $U=17,5 \text{ В}$, $N=142 \text{ Вт}$.

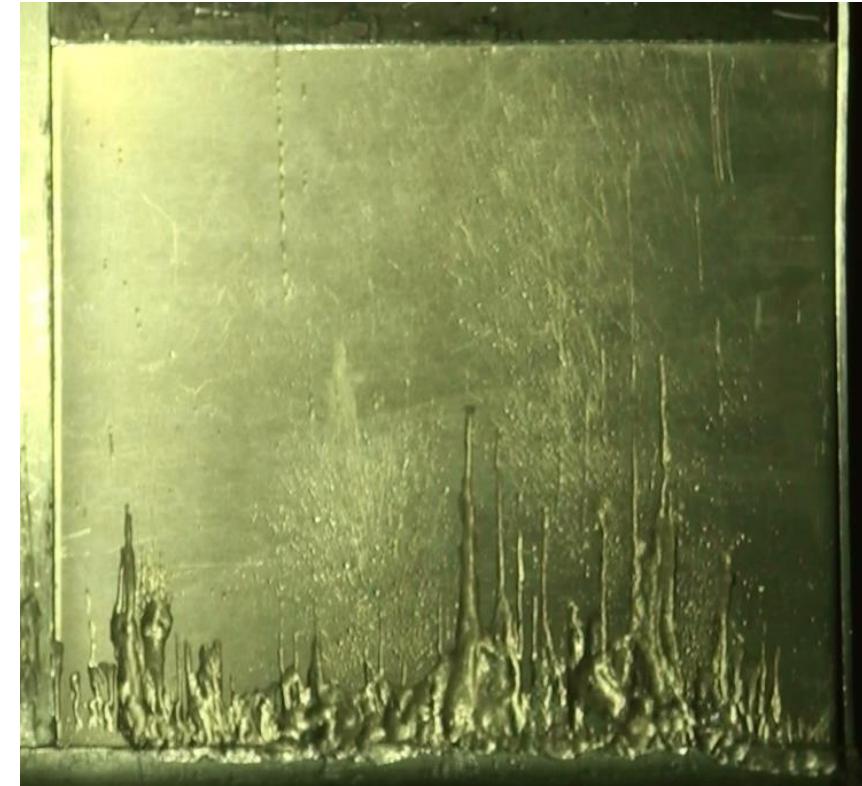
Длительность испытаний: 13 минут (6 минут для контрольного образца).

Время t мин:сек	Координата X (0-130) мм	Наблюдаемые явления и комментарии	Тип льда
00:00		Супергидрофобное покрытие + электрообогрев $U=17,5 \text{ В}$, $N=124 \text{ Вт}$	
05:30	-	Образование и удаление льда на передней кромке макета	-
12:00		Супергидрофобное покрытие + электрообогрев $U=18,5 \text{ В}$, $N=159 \text{ Вт}$	
12:30	-	Лёд не образуется	-
19:30	-	Завершение эксперимента	-

Результаты испытаний



Супергидрофобный образец



Контрольный образец



**Спасибо
за внимание!**