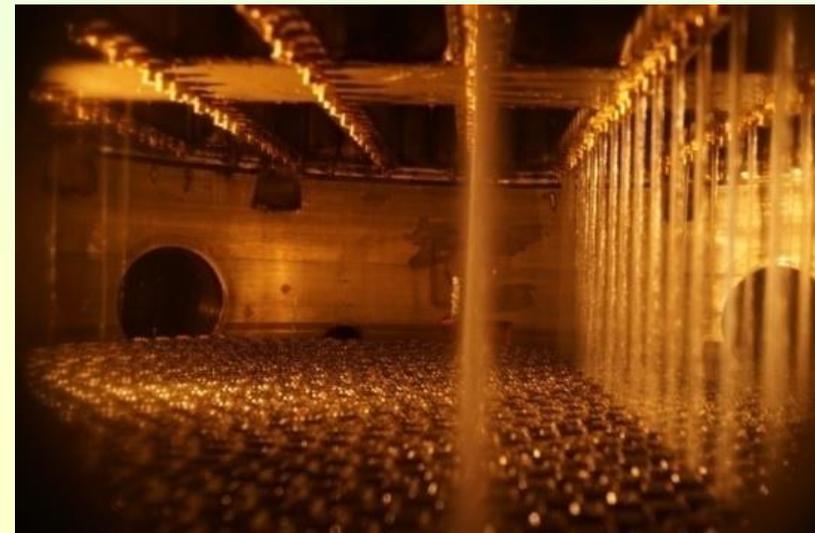
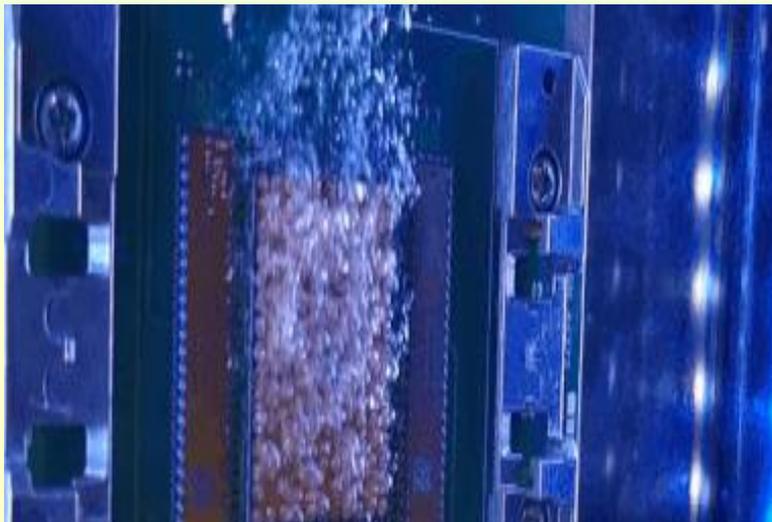


Доклад на заседании президиума СО РАН, г. Новосибирск, 17 марта 2022 г.

**Управление экстремальными процессами
теплообмена при кипении и испарении для
повышения эффективности и безопасности
оборудования в энергетике, химической
промышленности и микроэлектронике.**

**Член-корреспондент РАН, заведующий лаб.
низкотемпературной теплофизики ИТ СО РАН, д. ф.- м. н.
Павленко Александр Николаевич**



Сибирское
Отделение
Российской
Академии Наук
Институт
Теплофизики им.
С.С. Кутателадзе

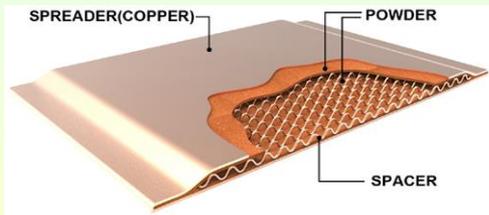


Результаты в области решения прикладных проблем

Охлаждение
микроэлектронного
оборудования

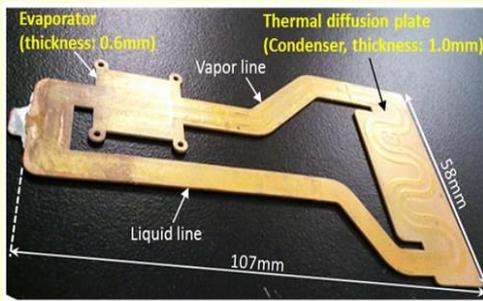
Большие центры
обработки данных,
150 МВт

Теплообменники-испарители
Энергетическое оборудование
Дистилляционное оборудование,
ожижители природного газа
Пищевые технологии, холодильная техника
Охлаждение сверхпроводящих
электрических двигателей, магнитов,
НТСП- и ВТСП- кабелей. Авиационная,
ракетная техника. Закалка.
Теплонасосная техника, тепловые трубы,
тепловые сифоны, паровые камеры.
Охлаждение в микроэлектронике, силовой
электронике



Электрический ВТСП-двигатель
для авиации

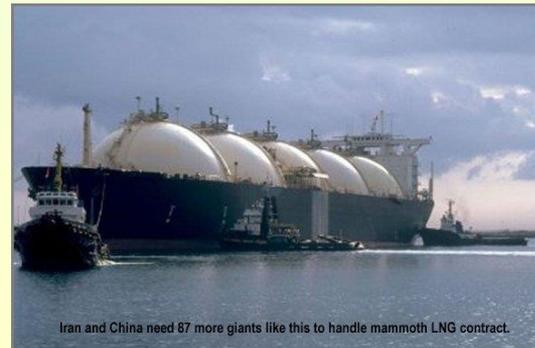
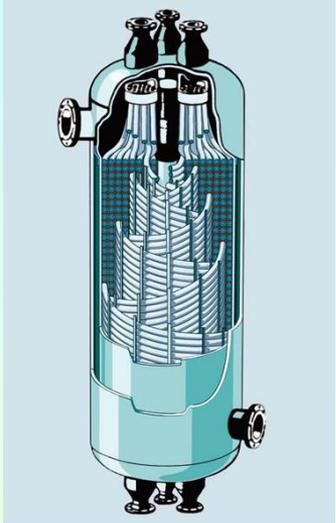
Паровая камера



системы
охлаждения
мобильного
телефона

СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ И
ОТВОДА ТЕПЛА В КОСМИЧЕСКИХ
АППАРАТАХ

Области приложения результатов по интенсификации теплообмена при пленочных течениях в современных технологиях: Сжижение природного газа в спиральных теплообменниках



Iran and China need 87 more giants like this to handle mammoth LNG contract.

Технология сжижения природного газа с применением смешанного хладагента (Double Mixed Refrigerant — DMR), представляющего собой смесь азота, метана, этана и пропана. Охлаждение газа в спиральных трубах до температуры $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ осуществляется при испарении стекающей по внешней поверхности труб пленки хладагента. В результате газ внутри труб переходит в жидкое состояние и уменьшается в объеме в 600 раз. Таким образом получается готовый продукт — СПГ, который можно перевозить и хранить.

ПАВЛЕНКО Александр Николаевич

Кандидат в академики РАН по Отделению ЭММПУ РАН на вакансию для Сибирского отделения РАН по специальности "теплофизика, теплотехника». Заведующий лабораторией ФГБУН Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (г. Новосибирск), р. 30.11.1959, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук.

Выдвинут Ученым советом ФГБУН Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН и академиками РАН Леонтьевым А.И., Марковичем Д.М. и Ребровым А.К.

Являюсь специалистом в области теплофизики, криогенной техники и химического машиностроения, автором **519** научных работ, в том числе после избрания членом-корреспондентом РАН в 2008 г. **416** научных работ, из них 2 монографий.

Индекс Хирша: РИНЦ – 23; Scopus – 20; WoS – 18. Суммарное число цитирований автора (РИНЦ) – 2400.

Последние 5 лет – ежегодное количество ссылок по Web of Sciences ~ 150-190.

Основные научные результаты:

- разработана теория кризиса кипения при нестационарном тепловыделении;
- экспериментально и теоретически исследованы механизмы развития самоподдерживающегося фронта испарения в метастабильной жидкости и динамика смены режимов кипения;
- впервые исследованы закономерности теплообмена и кризисных явлений в стекающих пленках жидкости при нестационарных набросах тепла;
- разработаны высокоэффективные методы интенсификации теплообмена при испарении и кипении в различных гидродинамических режимах с использованием микроструктурированных поверхностей;
- развиты научные основы процессов теплообмена при дистилляции с использованием структурированных насадок, служащие базой для создания новых современных высокоэффективных энергетических и криогенных технологий.

Под научным руководством и научном консультировании Павленко А.Н. подготовлено девять кандидатов и два доктора наук, защищено более 30 дипломных работ магистров и бакалавров.

Павленко А.Н. – главный редактор журнала «**Journal of Engineering Thermophysics**» (IF-1.41 по WoS), член редколлегии журналов «**Journal of Enhanced Heat Transfer**», «**Теплофизика высоких температур**», редакционного совета журнала «**Тепловые процессы в технике**»,

член:

Научного совета Международного комитета по тепломассообмену (**ICHMT**),

Национального комитета по тепломассообмену РАН (**НКТМО**),

Объединенного Ученого совета по механике и энергетике СО РАН,

председатель секции № 1 Ученого совета ИТ СО РАН,
диссертационного совета при ИТ СО РАН,

председатель оргкомитета регулярной международной конференции **IWHT-2019** (г. Новосибирск),
на которой очно приняли участие более **100 зарубежных ученых**,

организатор и председатель оргкомитета **7-ми международных семинаров ISHM**,

член оргкомитета более 40 международных и российских конференций.

Дополнительная информация: на выборах в 2016 г. Павленко А.Н. выдвигался кандидатом в академики РАН по Отделению ЭММПУ РАН по специальности "теплофизика" * Ученым советом ФГБУН Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН и академиками РАН Леонтьевым А.И., Накоряковым В.Е. и Ребровым А.К.

Павленко А.Н. являлся и является руководителем целого ряда базовых бюджетных и интеграционных проектов СО РАН (совместно с Институтом теплофизики УрО РАН, ИСЭМ СО РАН), проектов по Программам ОЭММПУ РАН, многих грантов РФФИ (в том числе, с учеными Германии (Institute of Heat and Mass Transfer, RWTH), Болгарии (Institute of Chemical Engineering), гранта фонда "Научный потенциал», 2-х грантов фонда РФФ, в том числе, крупного проекта РФФ с участием зарубежных ученых (TJU, Китай: 2014- 2018 гг.- отмечен в книге к 5-му юбилею РФФ в качестве одного из лучших выполненных проектов РФФ, 2019-2021 гг.).

На протяжении многих лет (с 1992 г. по 2021 г.) вел большую творческую работу по долгосрочному научно-техническому сотрудничеству с фирмой "Air Products and Chemicals, Inc.» (США), плодотворно сотрудничал с Институтом теплообмена RWTH (Германия), проводил научные исследования с компанией "BASF SE" (2011-2012 гг., Германия), успешно сотрудничал с компанией "National PeiYang Distillation Tech. Eng. Limited Company" и с Тяньцзинским университетом TJU (с 2014-2018 гг., Китай). За успешное и плодотворное сотрудничество с крупнейшей компанией криогенного машиностроения он награжден 4-мя почетными сертификатами.

Многократно выступал с пленарными лекциями и приглашенными докладами на престижных международных (более 30 пленарных лекций и приглашенных докладов) и отечественных (более 20 лекций и приглашенных докладов) симпозиумах и научно-практических конференциях.

Список работ, проведенных под руководством Павленко А.Н., и вошедших в «Важнейшие результаты по **фундаментальным исследованиям**» РАН и СО РАН

- ❖ Кризис теплоотдачи при кипении в условиях нестационарного тепловыделения в жидкости (1989).
- ❖ Переходные, кризисные процессы и возникновение регулярных структур при кипении и испарении в стекающих пленках жидкости (1998).
- ❖ Обнаружение аномального поведения динамической кривой кипения во фронте смены режимов кипения и его учет при моделировании переходных процессов (2000).
- ❖ Экспериментальное обнаружение роста амплитуды волн при интенсивном испарении в стекающих пленках жидкости (2001).
- ❖ Динамика пузырькового распада жидкости и развития кризисных явлений при высокоинтенсивном кипении в тонкопленочных и микромасштабных системах (2004).
- ❖ Выявление закономерностей распада жидкости и обнаружение метастабильных регулярных структур в стекающих пленках при нестационарном тепловыделении (2006).

Список работ, проведенных под руководством Павленко А.Н., и вошедших в «Важнейшие результаты по **фундаментальным исследованиям**» РАН и СО РАН

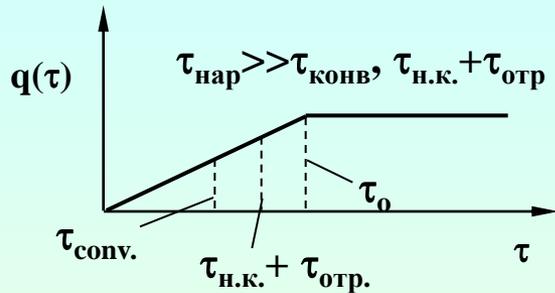
- ❖ Взаимосвязь распределения потоков и эффективности разделения смесей при дистилляции в сложных канальных системах (2008).
- ❖ Динамика вскипания жидкости и развитие кризисных явлений в стекающих пленках при интенсивных набросах теплового потока (2009).
- ❖ Особенности развития переходных процессов при кипении в наножидкостях в условиях нестационарного тепловыделения (2011).
- ❖ Особенности кипения и динамика развития кризисных явлений в стекающих пленках недогретой жидкости при нестационарном тепловыделении (2013).
- ❖ Механизмы развития межфазной поверхности самоподдерживающихся фронтов при интенсивном испарении (2014).
- ❖ Физика локального теплообмена при кипении: внутренние микрохарактеристики и динамика микрослоя (2017).
- ❖ Влияние давления на локальные характеристики и эволюцию сухих пятен при пузырьковом кипении жидкостей (2020).

**Список работ, проведенных под руководством
Павленко А.Н., и вошедших в «Важнейшие результаты
по **прикладным** исследованиям»
РАН и СО РАН**

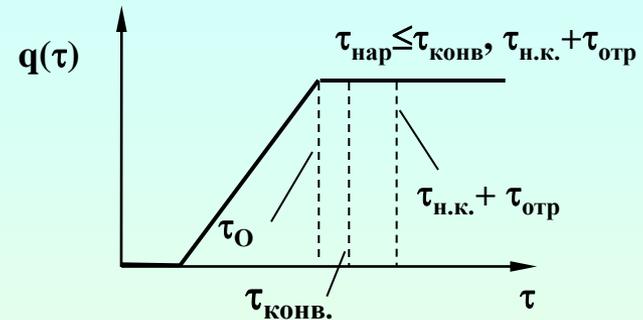
- ❖ Теплообмен и кризисные явления при пленочных течениях жидкостей и их смесей на структурированных поверхностях (2012).
- ❖ Новый метод повышения эффективности разделения смесей при дистилляции на структурированных насадках (2015).
- ❖ Интенсификация теплообмена при кипении и повторном смачивании сильно перегретых поверхностей с использованием микроструктурированных капиллярно-пористых и низкотеплопроводных покрытий (2016).
- ❖ Разработка новых подходов к повышению эффективности разделения смесей в крупномасштабных дистилляционных колоннах (2018).
- ❖ Интенсификация теплообмена в стекающих по модифицированным МДР-поверхностям плёнках жидкостей (2019).
- ❖ Интенсификация теплообмена при кипении/испарении в условиях пленочного орошения с износостойкими модифицированными методом микродугового оксидирования (МДО) поверхностями (2021).

Модельное описание кризиса при нестационарном тепловыделении

квазистационарное тепловыделение



нестационарное тепловыделение



УСЛОВИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА : $E_1 + E_2 \geq k' r \rho'' D_{отр.}$;

$$E_1 = f_1(\Delta T_{н.к.}(q), \tau_H^*, q) ;$$

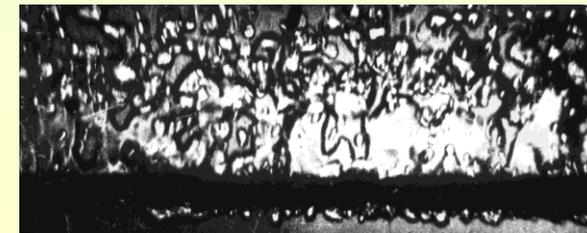
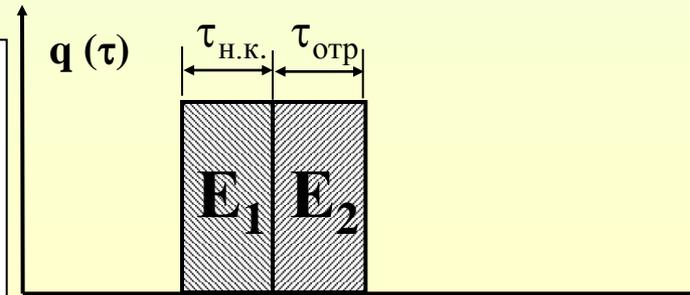
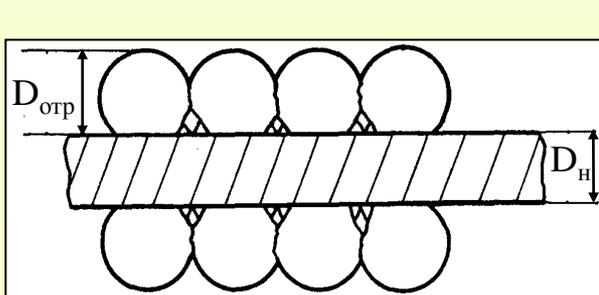
$$E_2 = f_2(Ja^*(\Delta T_{н.к.}), D_{отр.}, \tau_H^*, q)$$

$$k' \approx 0.9(1 + 0.9 \cdot D_{отр.} / D_H)$$

УСЛОВИЕ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА при развитии свободной конвекции:

$$T_H(\tau, q) \geq T_{нас.} + \Delta T_{н.к.}$$

$$\tau_{конв.} = f_3(Ra_{кр.}, \tau_H^*, q)$$



Критический тепловой поток при нестационарном тепловыделении

Разработанная модель описания кризиса кипения при нестационарном тепловыделении на сегодняшний день является наиболее полной и законченной, а полученные на ее основе расчетные зависимости для критического теплового потока могут быть успешно использованы для широкого класса жидкостей в широком диапазоне изменения режимных параметров и характеристик тепловыделяющей стенки.

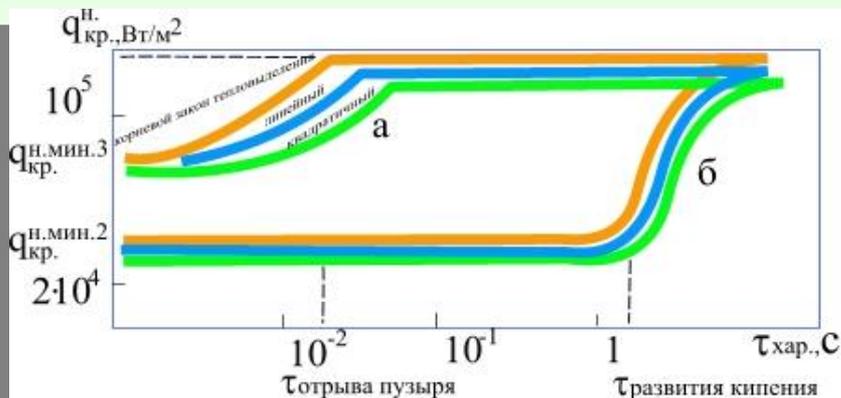
$$q_{кр.}^{н.мин.1} = 1.2 \cdot 10^5 \frac{(k')^{1/8} (\tau^*)^{0.36} \cdot (\sigma \cdot T_{нас.})^{0.79} \cdot (\lambda')^{1.37}}{d_{отр.}^{2.51} \cdot (r \cdot \rho'')^{0.59} \cdot (c' \cdot \rho')^{0.56}}$$

при $P/P_{кр.} \geq 0.01$ - кривая (3) при $\Delta T_{закип.} = \sqrt{c \frac{\sigma \cdot T_{нас.} \cdot q}{r \cdot \rho'' \cdot \lambda'}}$,

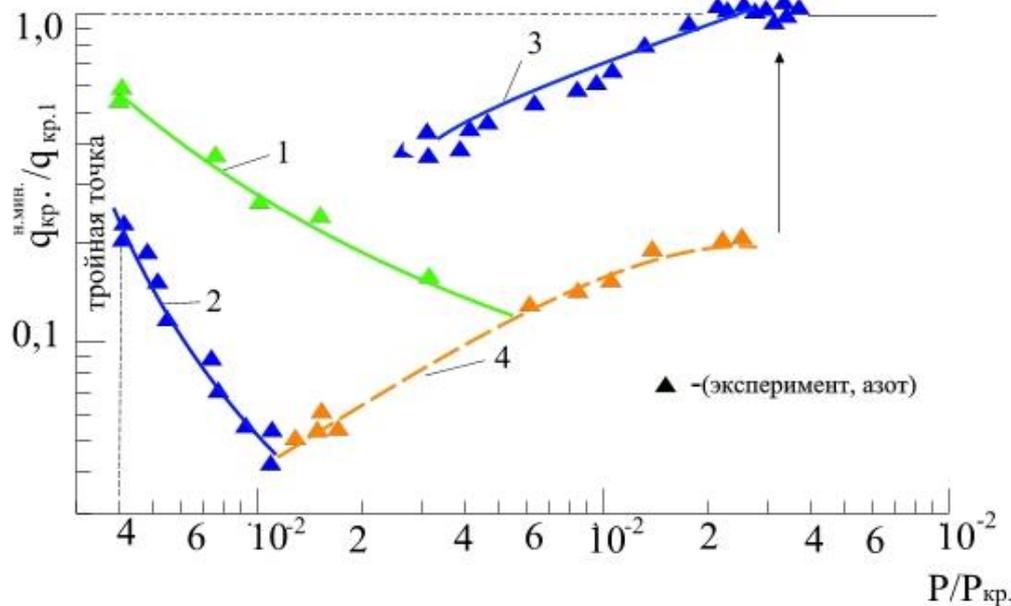
$$q_{кр.}^{н.мин.2} = 0.54 \left\{ \frac{g \cdot \beta' \cdot (T_{закип.} - T_{нас.})^5}{\nu' a' \cdot d_{нагр}} \right\}^{0.25} \lambda'$$

при $P/P_{кр.} \leq 0.01 - 0.05$ - кривая (1) при $T_{закип.} = T_{п.п.}$,

кривая (2) при $T_{закип.} = \frac{2A \cdot T_{нас.}}{r \rho'' \cdot r_{с.макс}}$



НАЛИЧИЕ (а) И ОТСУТСТВИЕ (б) ГОТОВЫХ ЦЕНТРОВ ПАРООБРАЗОВАНИЯ.

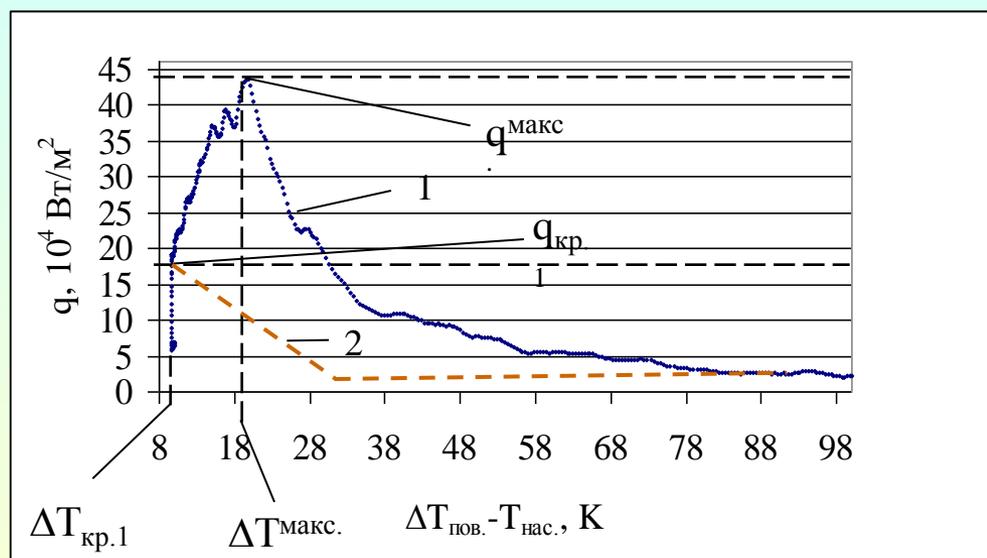


Исследование динамики смены режимов кипения. Тепловая устойчивость локальных очагов пленочного кипения

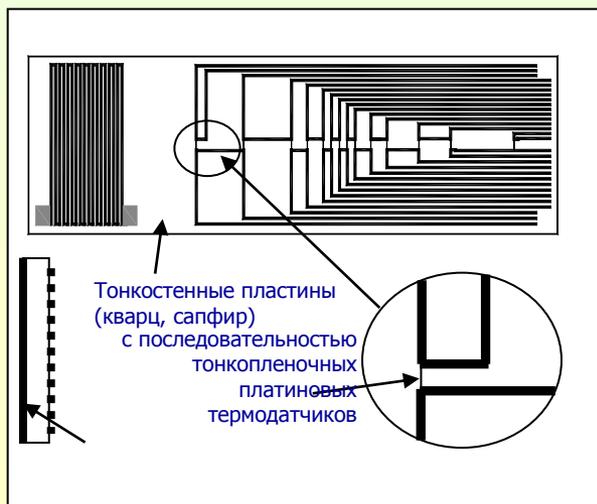


Распространение пленочного режима кипения. Азот.

Аномальное поведение динамической кривой кипения во фронте смены режимов кипения



Динамическая кривая кипения (1) в процессе распространения фронта смены режимов кипения. Жидкий азот; 2 – стационарная кривая кипения



ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ

НЕСТАЦИОНАРНОЕ УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В НАГРЕВАТЕЛЕ

$$\frac{\partial T_h}{\partial t} = LT_h + f(T_h)$$

$$L = \frac{\lambda_h}{c_h \rho_h} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \text{ - в одномерном случае, } L = \frac{\lambda_h}{c_h \rho_h} \left(\frac{\partial^2}{\partial R'^2} + \frac{1}{R'} \frac{\partial}{\partial R'} \right) \text{ - в двумерном}$$

$$f(T_h) = (\delta_h c_h \rho_h)^{-1} (q - \alpha_i (T - T_s))$$

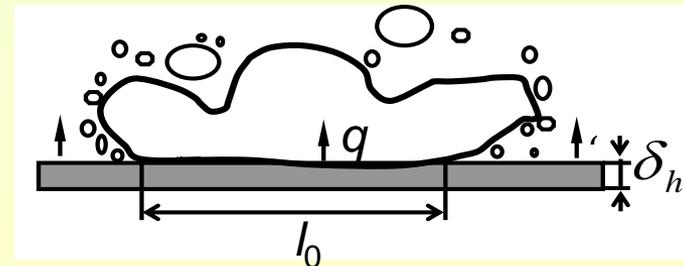
$q = \text{const}$,

$i = \{\text{пуз. кип, пл. кип, пер. кип}\}$

$$f(T_h) = (\delta_h c_h \rho_h)^{-1} \{q - q_{\text{пуз, пер. кип}}^{\text{cp}} (1 + F(R_1) \sin(2\pi\omega\tau))\}$$

В приближении модели с пульсациями плотности теплового потока в окрестности фронта

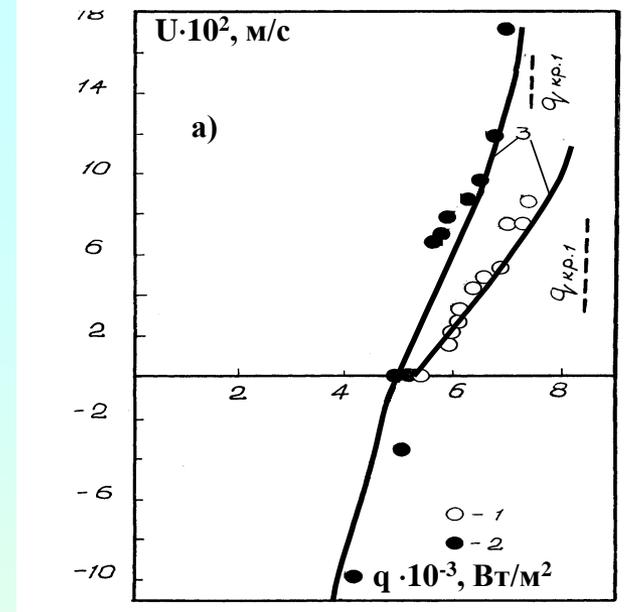
Функционал, характеризующий относительную амплитуду пульсаций в окрестности протяженностью R_1 , равен нулю вне этой окрестности.



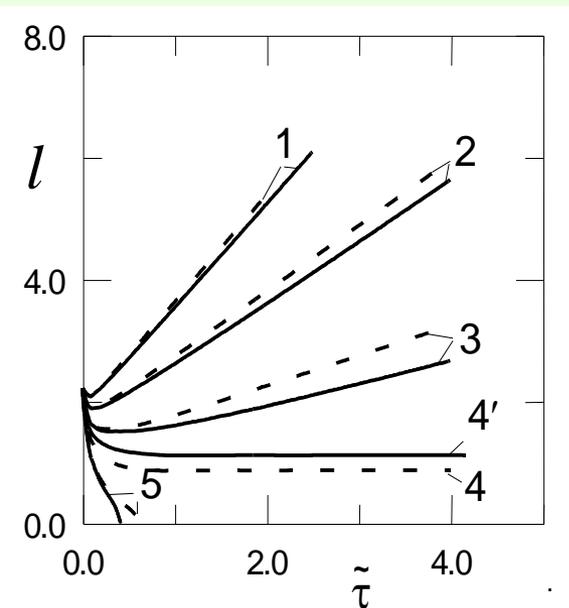
Предложен безразмерный параметр, характеризующий граничные условия во фронте смены режимов кипения:

$$\varepsilon = \frac{\delta_{\text{хар.}}}{\Lambda} = \left(\frac{\lambda_{\text{н.}} \delta_{\text{н.}} g(\rho' - \rho'')}{\tilde{\alpha}_{\text{пуз.кип.}} \cdot \sigma} \right)^{1/2}$$

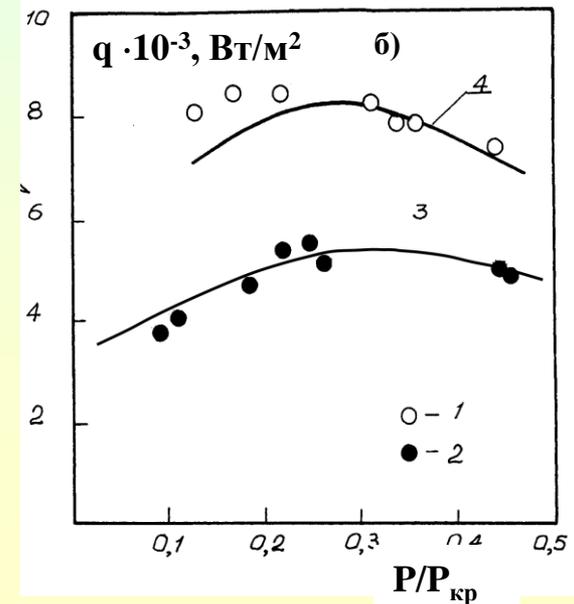
$$\Delta T_{\text{гр}}^{\text{макс}} = \Delta T_{\text{кр.1}} + \frac{\Delta T_{\text{пр}} - \Delta T_{\text{кр.1}}}{1 + m \cdot \varepsilon^n}$$



Гелий. а: 1 – $P_{\text{нас}} = 0.052$ МПа; 2 – $P_{\text{нас}} = 0.101$ МПа; б: 1 – $q_{\text{кр.1}}$; 2 – $q_{\text{рав}}$; 3 – расчет $U, q_{\text{рав}}$ Трехзонная модель кривой кипения ($T_{\text{гр.1}} = T_{\text{пр}}$; $T_{\text{гр.2}} = T_{\text{кр.2}}$, $\varepsilon \ll 1$); 4 – $q_{\text{кр.1}}$.



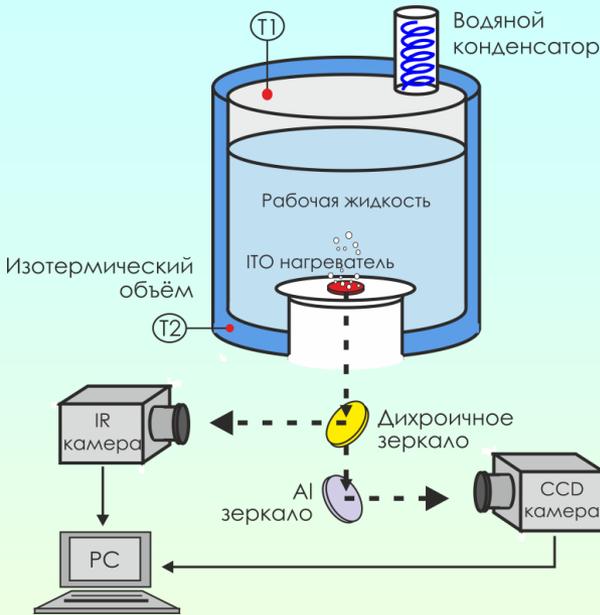
Азот. Двухзонная модель кривой кипения ($\varepsilon = 0.153$, $T_{\text{гр}} = T_{\text{пр}}$). Сплошные кривые – круглые очаги на плоской поверхности, пунктирные кривые – одномерные очаги. $q, 10^4$ Вт/м²: 1 – 21.2, 2 – 15.0, 3 – 10.0, 4 – 6.8, 4' – 8.4, 5 – 5.0.



Микрохарактеристики при пузырьковом кипении жидкостей.

Нестационарный теплообмен

Синхронизированная высокоскоростная видеосъемка (HSV) и высокоскоростная инфракрасная термография (IR)



Параметры:

- Исследуемые жидкости: этиловый спирт, вода.

Инфракрасная термография (IR):

- Камера FLIR Titanium HD 570M (1000 кадр/с)
- Разрешение: 160x128, ~ 0.0125 мм/рх.

Высокоскоростная видеосъемка (HSV):

- Камера Vision Research Phantom v. 7.0 (1000÷5000 кадр/с)
- Разрешение: 800x600, ~ 0.06 мм/рх.

$$q = 54 \text{ кВт/м}^2$$

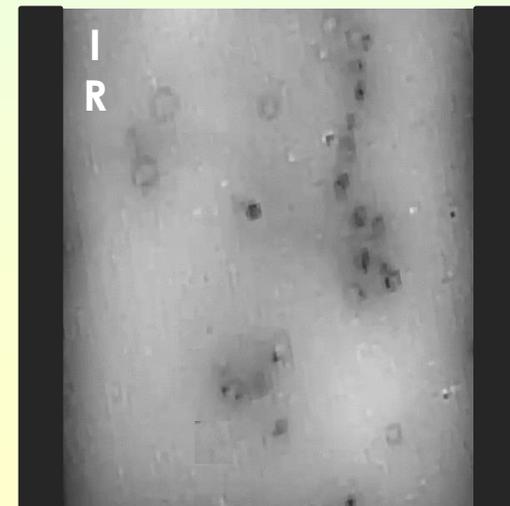
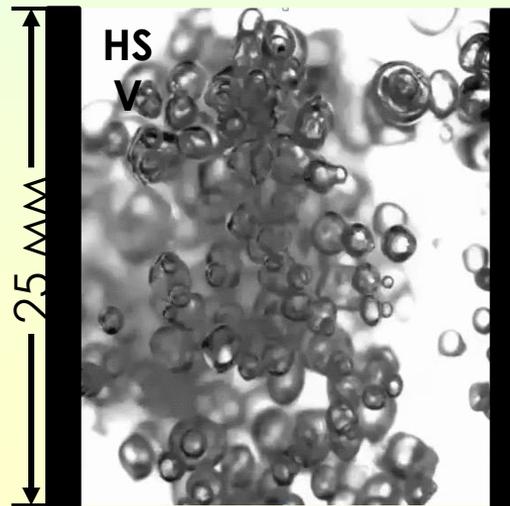
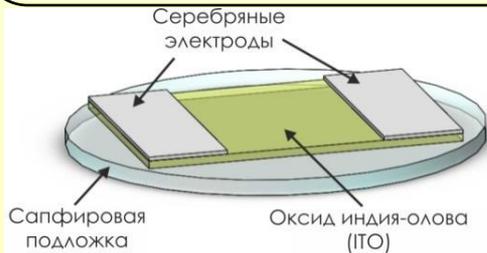
Ито нагреватель

ИТО - оксид индия-олова:

- Прозрачный (300-750 нм)
- Непрозрачен в ИК-диапазоне

Толщина: • Площадь – 20x30 мм²

- Сапфир – 400 мкм
- ИТО – 1 мкм
- Ag электроды – 5 мкм.



T, °C

110

105

100

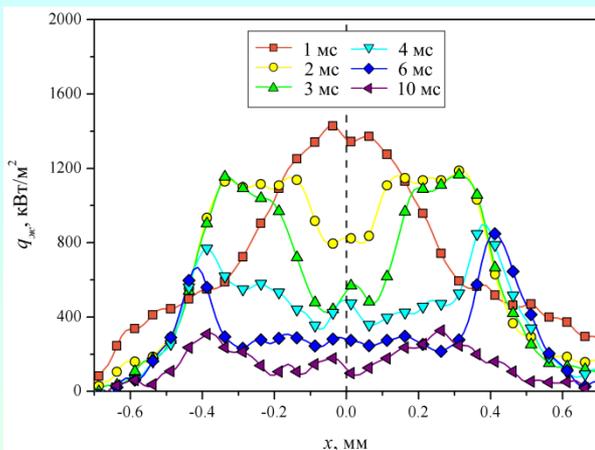
95

88

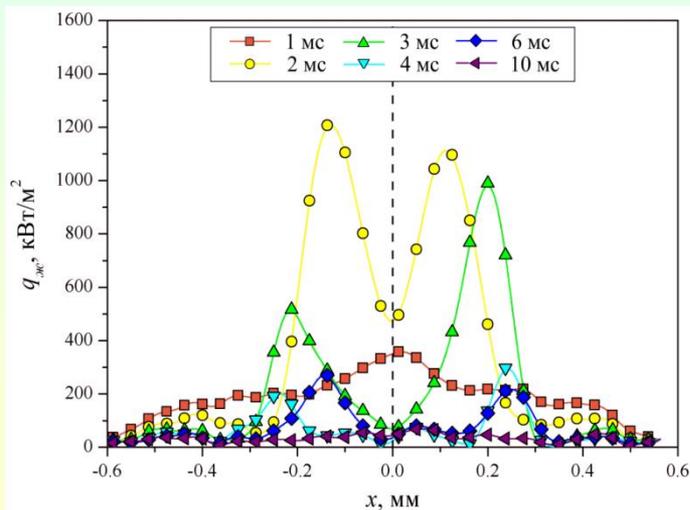
80

Динамика микрослоя. Нестационарный теплообмен

Этиловый спирт,
 $q = 50 \text{ кВт/м}^2$

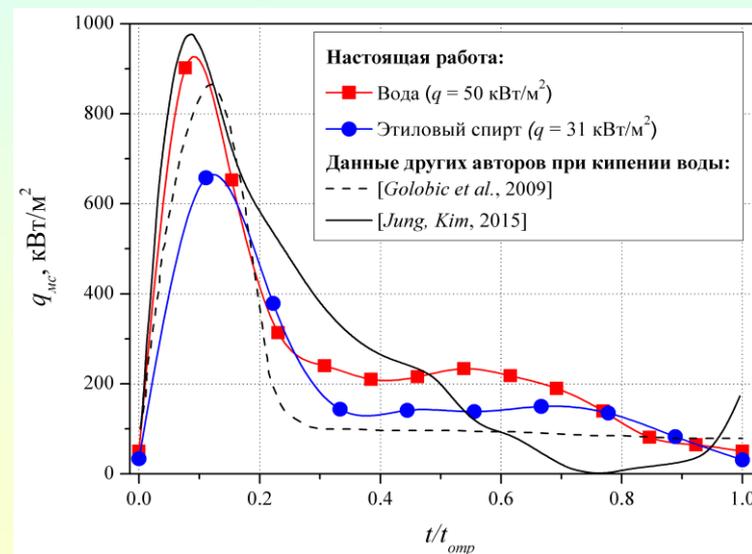


Вода,
 $q = 60 \text{ кВт/м}^2$



Эволюция плотности локального теплового потока, усредненного по области микрослоя

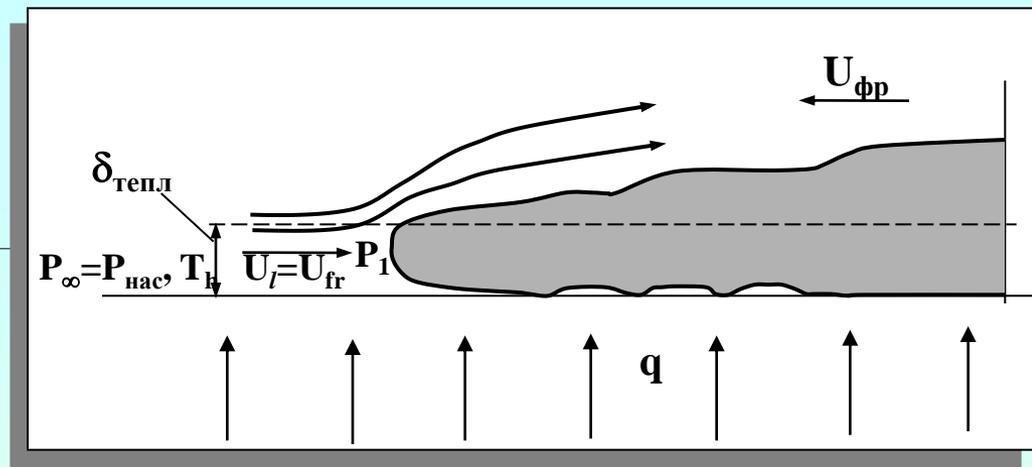
Обнаружено, что стадия отрыва паровых пузырей при кипении воды и этилового спирта при различных тепловых нагрузках начинается после полного испарения микрослоя жидкости под паровым пузырем. Выявлено, что для обеих жидкостей скорость роста сухих пятен под паровыми пузырями постоянна во времени, а также увеличивается с ростом теплового потока.



С использованием численного моделирования теплообмена в области контактной линии при кипении воды и этанола на основе экспериментальных результатов рассчитана локальная плотность теплового потока, отводимого от поверхности нагрева при испарении жидкого микрослоя. Показано, что основной вклад в теплоотдачу испарение микрослоя вносит на начальной стадии роста парового пузыря ($t/t_{\text{отр}} < 0.3$, $t_{\text{отр}}$ – момент отрыва пузыря).

Эти результаты принципиально важны для развития теории теплообмена при кипении.

Модель самоподдерживающегося фронта испарения в перегретых жидкостях



$$U_{\text{фр}} = q_{\text{м.г}} / \tilde{r}'' \tilde{\rho}'' - U''$$

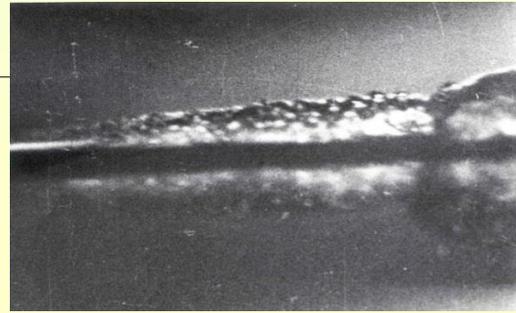
$$Nu = \frac{2}{\sqrt{\pi}} Re^{0.5} \quad Re = \frac{U_{\text{фр}} \delta_{\text{тепл}}}{a'} \sim 10^2 - 10^3 \quad \delta_{\text{тепл}}^{\text{н}} = 2.3 \sqrt{a' \tau_{\text{н.к}}} \quad \delta_{\text{тепл}}^{\text{ст}} = 2.88 \left(\frac{a' v'}{\Delta T_{\text{н.к}} \beta' g} \right)^{1/3}$$

$$U_{\text{фр}}^{\text{невозм}} = \frac{4}{\pi} \frac{(T_{\text{н.к.}} - \tilde{T}_{\text{нас.}}(P_1))^2 \lambda' c' \rho'}{\delta_{\text{тепл}} \tilde{r}^2 (\tilde{\rho}'')^2} \quad P_1 = P_{\infty} + \frac{\rho' \cdot U_{\text{фр}}^{\text{невозм}^2}}{2}$$

$$U_{\text{фр}} / U_{\text{пар}} = \alpha Ja^* (\Delta \tilde{T}_{\text{н.к.}}) \frac{k'}{k' + k_{\text{н}}} \quad U_{\text{пар}} = q / \tilde{r} \tilde{\rho}''$$

$$\tilde{q}_{\text{м.г}} = q_{\text{м.г}} / q_{\text{н.л}} \quad U_{\text{фр}}^{\text{возм.}} = U_{\text{фр}}^{\text{невозм}} (0.17 \tilde{q}_{\text{м.г}} + 0.36)$$

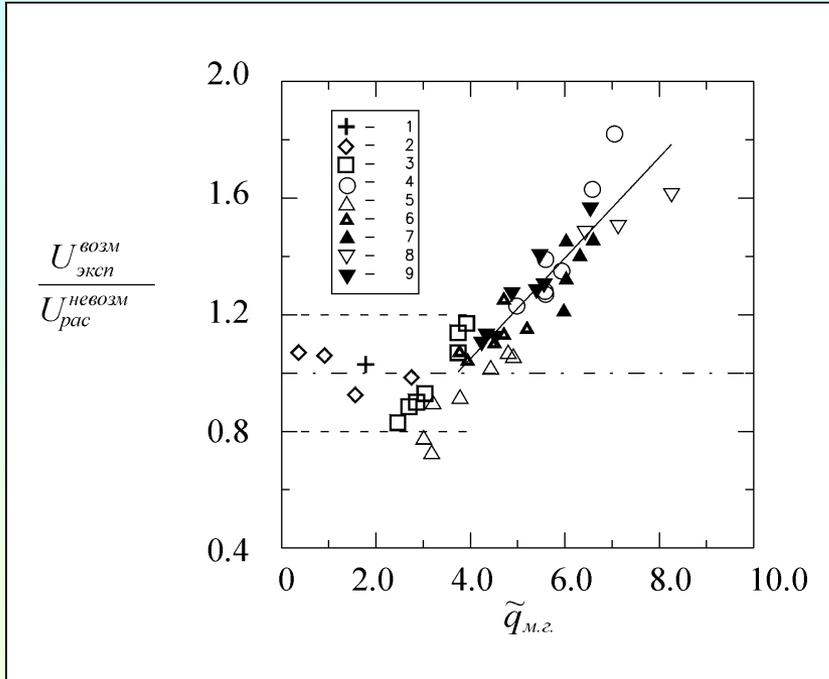
Впервые показано и описано влияние быстрорастущих на межфазной поверхности мелкомасштабных возмущений на скорость распространения фронта испарения.



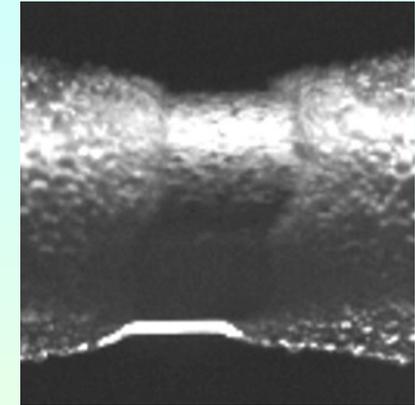
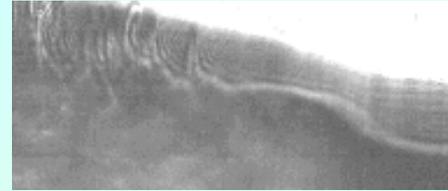
АЗОТ, $P_{\text{нас}} = 0.1$ МПа

$$\tilde{q}_{\text{м.г}} = \frac{q_{\text{м.г}}}{q_{\text{н.л}}} = 1.56$$

Обобщение экспериментальных данных по скорости распространения фронта испарения при различных безразмерных тепловых потоках через межфазную поверхность

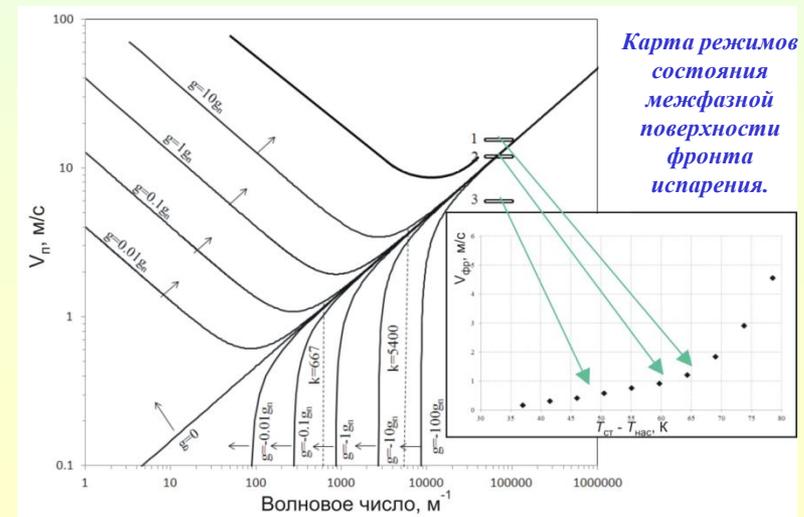


Механизмы развития межфазной поверхности самоподдерживающихся фронтов при интенсивном испарении.

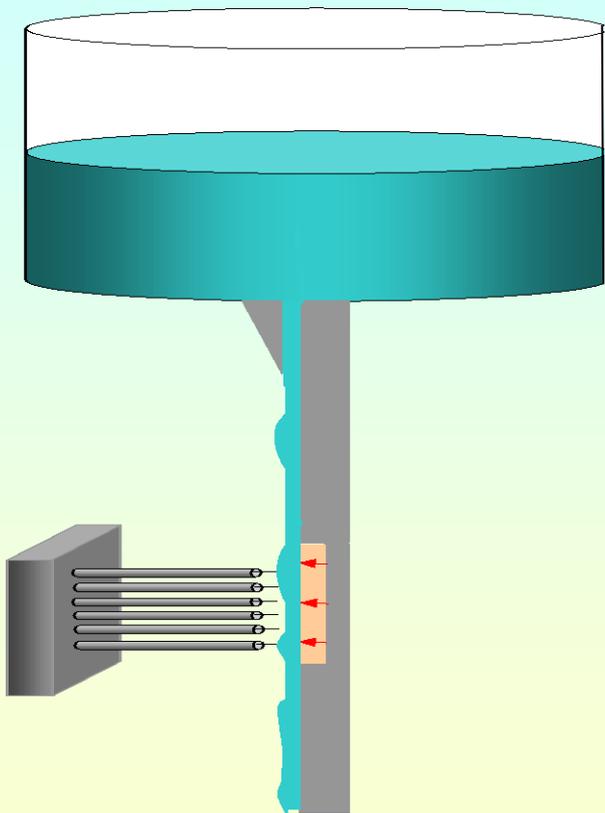


Распространение самоподдерживающегося фронта испарения: рост возмущений на межфазной поверхности в тепловом слое жидкости, форма фронтов на теплоотдающей поверхности.

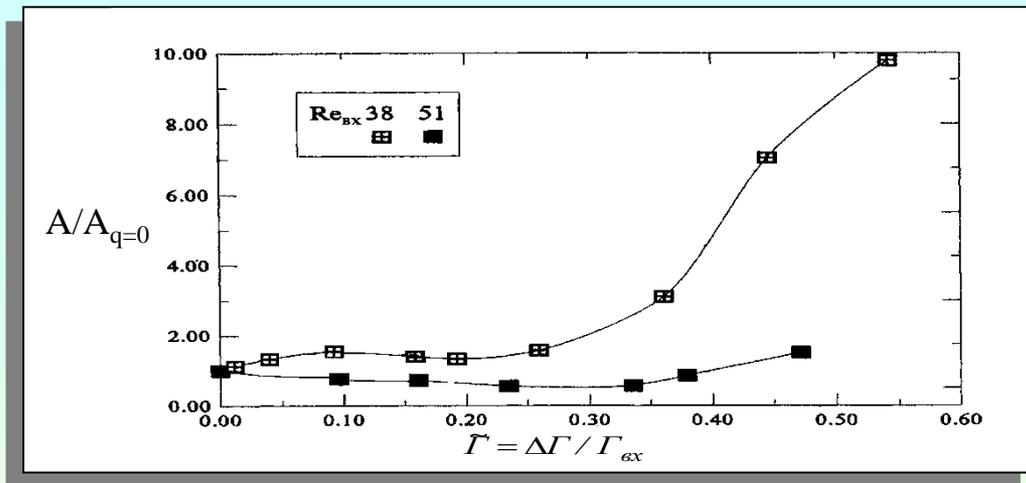
1, 2 – ступенчатое тепловыделение, Азот (Павленко А.Н.);
 (3-9) стационарное тепловыделение (Авксентюк Б.П. и др. :
 3 – Этанол ($6.9 \cdot 10^{-3}$ МПа); 4 – Ацетон ($27.6 \cdot 10^{-3}$ МПа);
 (5-8) – Бензин при $T_{н.к.} = 105 \text{ К}, 120 \text{ К}, 155 \text{ К}, 170 \text{ К}$, (данные получены при различных давлениях); 9 – Бензин при $9.8 \cdot 10^{-3}$ МПа, (данные получены при различных температурных напорах).
 Сплошная линия – расчет по обобщающей зависимости.



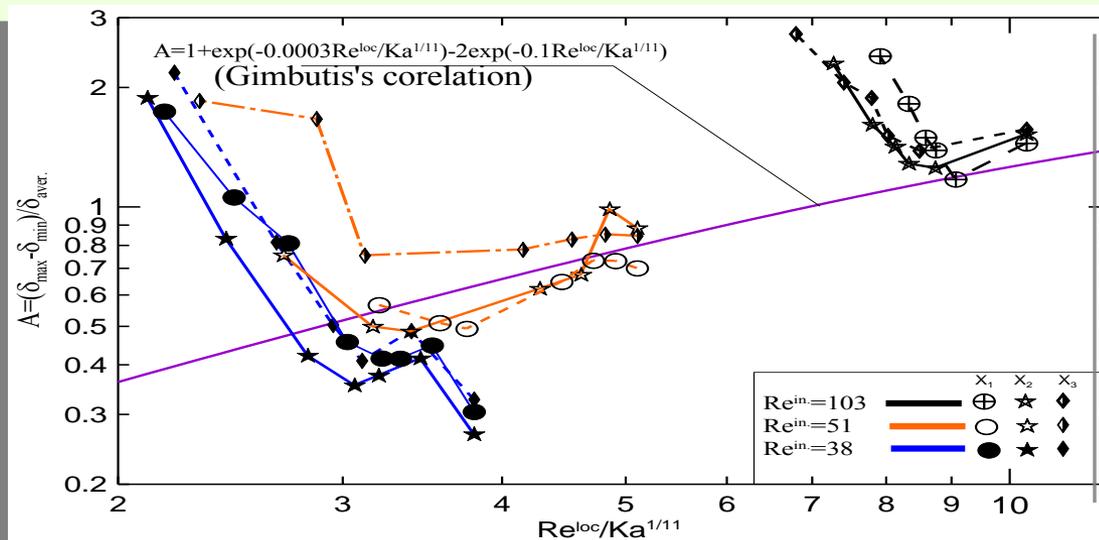
Экспериментальное обнаружение роста амплитуды волн при интенсивном испарении в стекающих пленках жидкости.



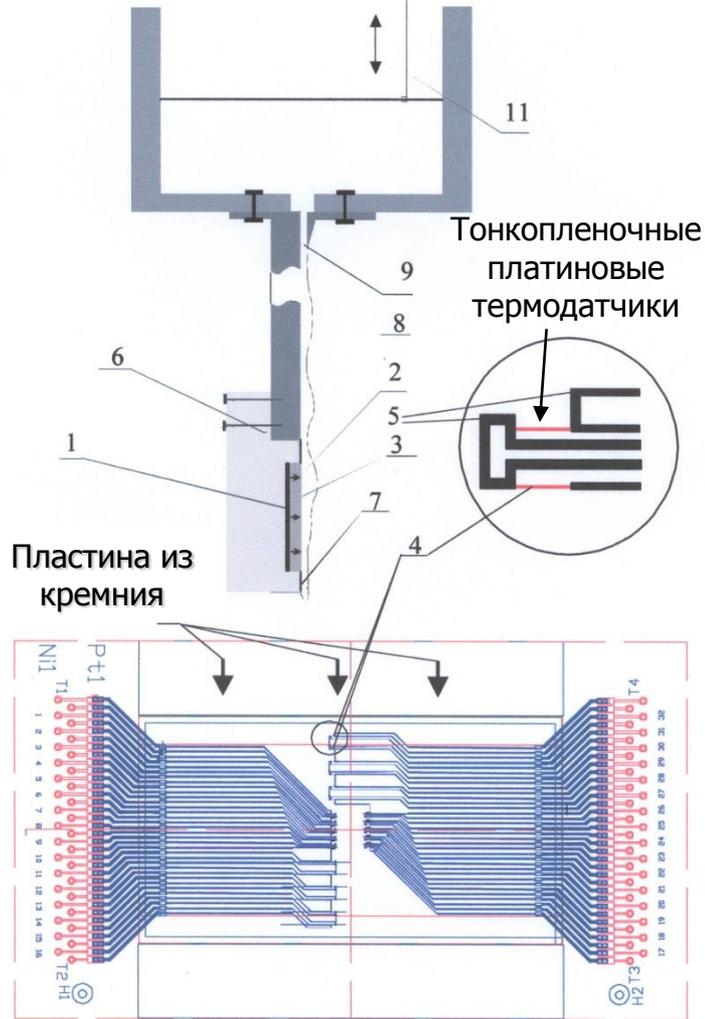
Последовательность емкостных датчиков для измерения локальной толщины волновой пленки жидкости



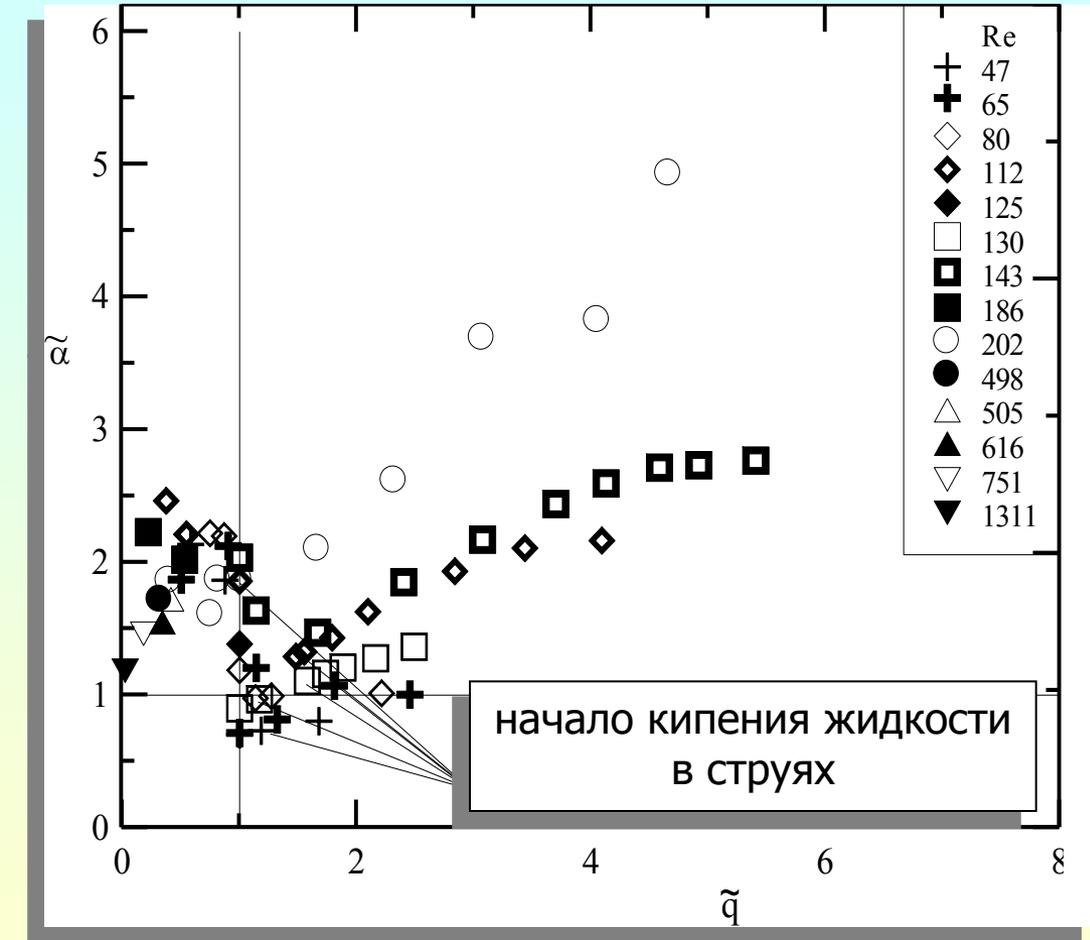
Зависимость относительной амплитуды волн от интенсивности тепловыделения



Интенсификация теплообмена в предкризисных режимах. Влияние «сухих» пятен на интенсивность теплообмена при развитии кризисных явлений

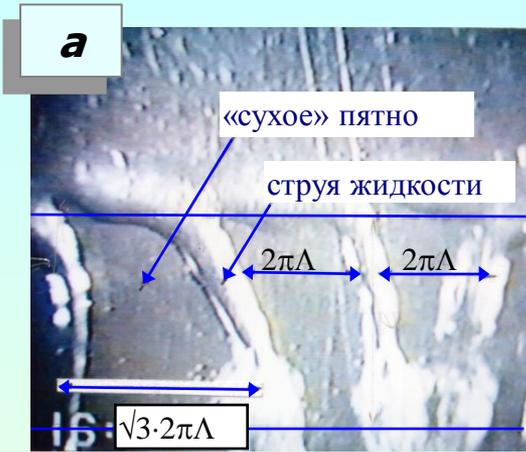


Экспериментальный участок для исследования локального теплообмена при кипении и испарении в стекающих пленках жидкости



Зависимость безразмерного коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока

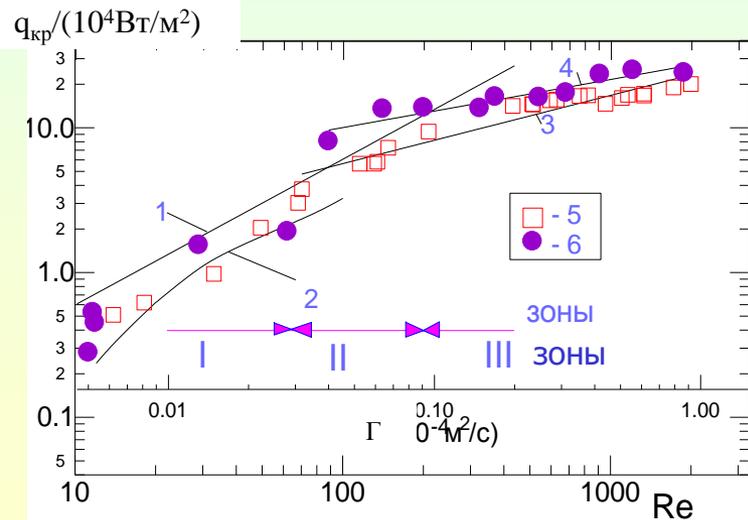
Обнаружение регулярных структур в испаряющихся (зона II) и кипящих (зона III) пленках жидкости



$We_1 > We_{кр.1}, We_2 < We_{кр.2}$:
зона II – $Re = 67, q/q_{кр.1} = 0.5$



$We_1 > We_{кр.1}, We_2 > We_{кр.2}$ ($Re = 420$). Зона III – $q/q_{кр.1} = 0.7; 0.95$



Зависимость критического теплового потока от числа Рейнольдса в зонах с различными механизмами развития кризиса теплообмена. 1 – расчет $q_{кр} = (\Gamma_{вх} r \rho') / L$

Расчетные зависимости авторов: Зона I – $We_1 < We_{кр.1}$

$$\begin{cases} q_{кр} = r \rho' \left(\frac{\delta_{ост} g}{3 v' L} + 0.25 \delta_{ост} \tilde{f} \right) \\ \delta_{ост}, \tilde{c}, \lambda = f_{1,2,3} [Re^{вых} (q_{кр})] \end{cases}$$

II – $We_1 > We_{кр.1}; We_2 < We_{кр.2}$; III – $We_1 > We_{кр.1}; We_2 > We_{кр.2}$) -

5, 6 – опытные данные авторов с $L_{нагр}^{II} / \tilde{\lambda}_{хар} \gg 1, L_{нагр}^{II} / \tilde{\lambda}_{хар} \approx 1$

$$q_{кр} / \rho'' r V_0 = 0.036 (\rho' / \rho'')^{2/3} (\delta / \rho' V_0^2 L)$$

Выявление новой разновидности кризиса теплоотдачи при кипении в пленках на протяженных поверхностях



$Re_{вх} = 600$. Длина нагревателя 42 мм.

а – режим регулярных сухих пятен ($q = 4.2 \cdot 10^4$ Вт/м², $q/q_{кр} = 0.89$);
б, в – распространения фронта осушения при $q_{кр} = 4.7 \cdot 10^4$ Вт/м².

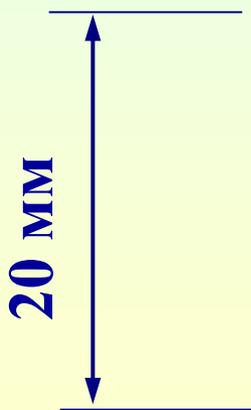


$$q_{кр} = q_{рав}^{ЛОК}$$

← Граница между нагревателями

← Граница между нагревателями

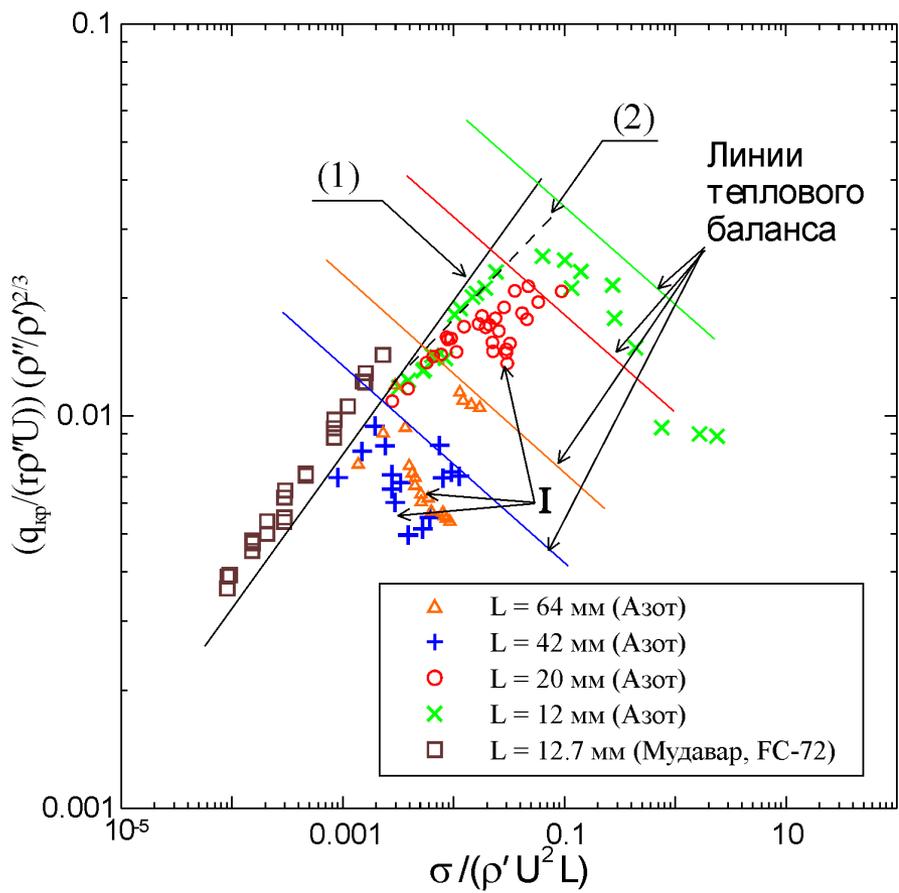
Скорость перемещения фронта ~ 0.2 мм/с



$Re_{вх} = 620$. Длина двухсекционного нагревателя 42 мм.

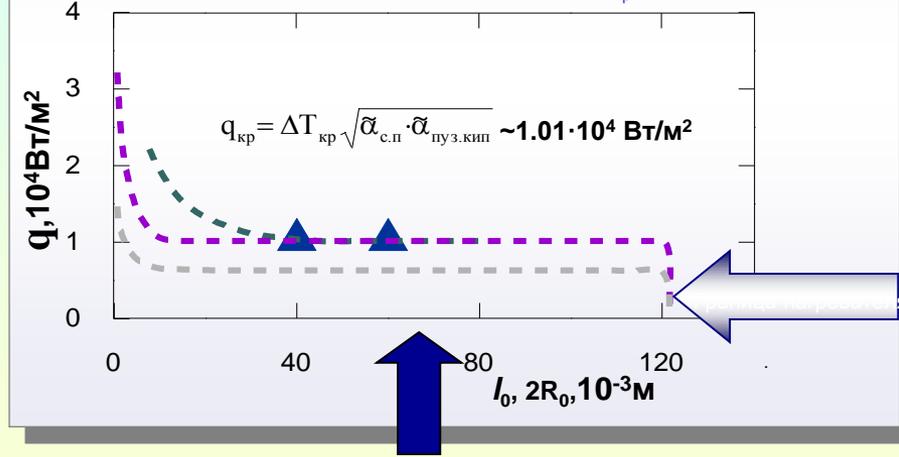
Распространение фронта осушения при превышении порога тепловой устойчивости сухих пятен

Обобщение опытных данных по величине критического теплового потока



Результаты численного эксперимента для пленочного течения жидкого азота по фольге из константана.

- - 3-зонная модель кривой теплообмена, 1-мерная задача, $\epsilon \geq 1$,
- - 2-зонная модель кривой теплообмена, 1-мерная задача, $\epsilon \ll 1$,
- - 2-зонная модель кривой теплообмена, двумерная задача, $\epsilon \ll 1$,
- ▲ - экспериментальные данные авторов для $q_{кр}$.

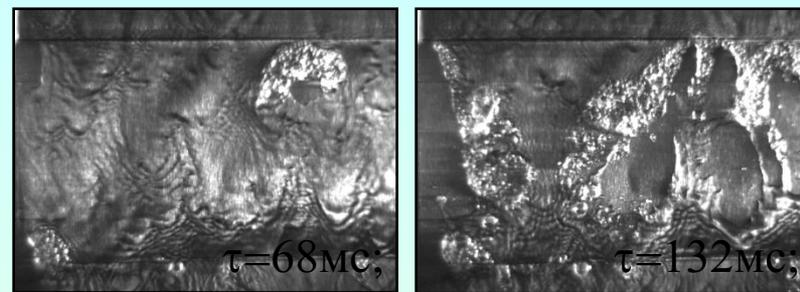
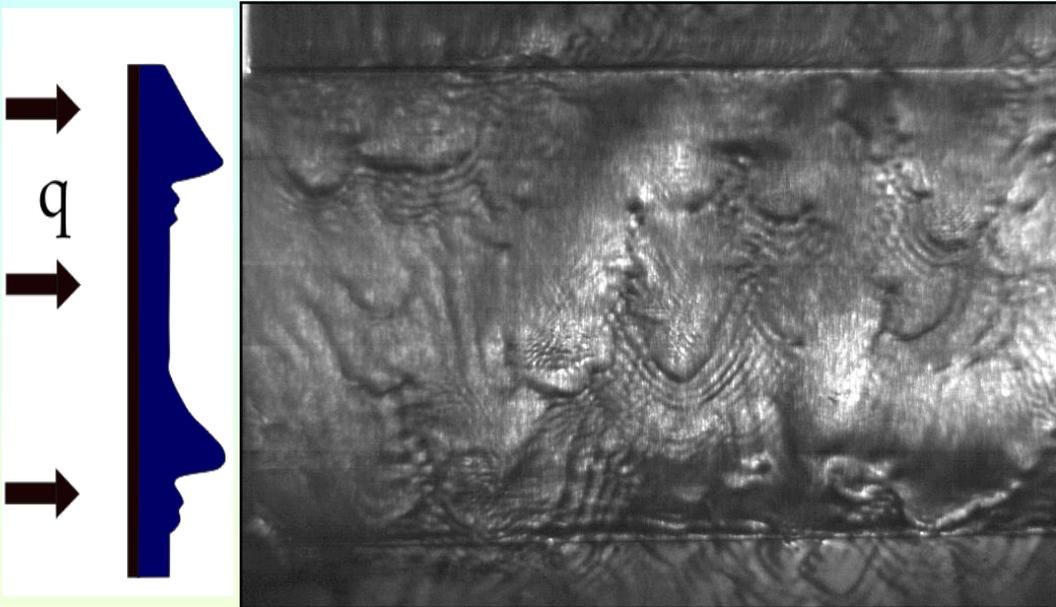


Равновесная плотность теплового потока в зависимости от начального размера сухого пятна.

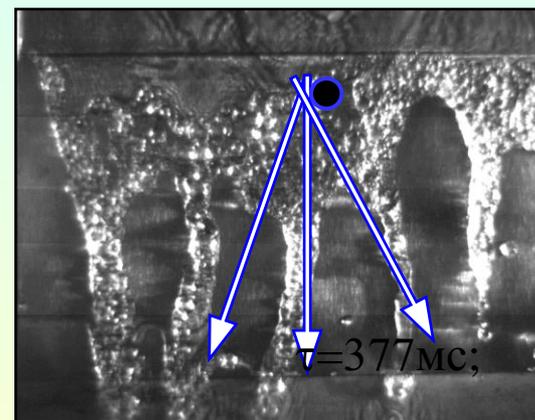
- 1 – расчет по гидродинамической модели;
- 2 – обобщающая зависимость Павленко А.Н. для коротких нагревателей;
- I – кризис осушения при достижении порога тепловой устойчивости сухих пятен.

Динамика переходных процессов при ступенчатом тепловыделении в стекающих пленках

$$Re_{вх} = 847, q = 6 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$$



Струи жидкости



$\tau = 377 \text{ мс}$

Последовательность кадров видеозаписи в режиме с формированием регулярных структур.

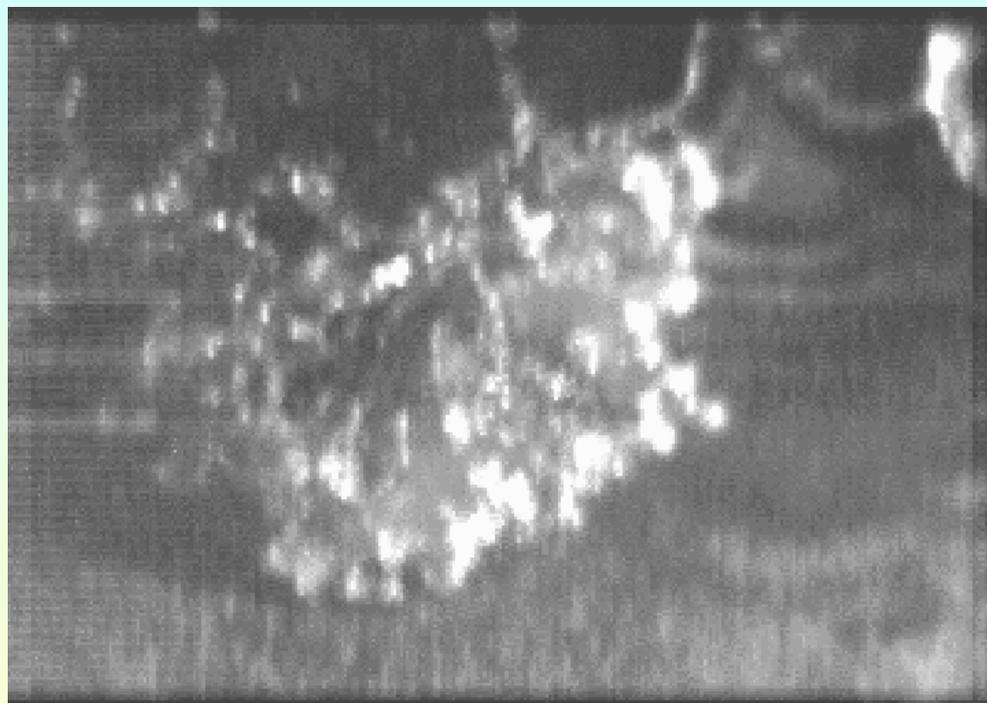
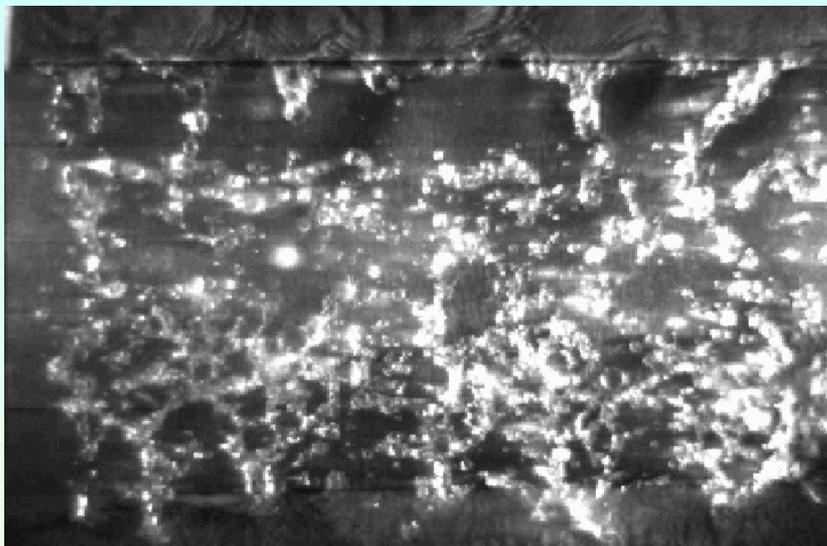
$$We_{кр} < We = 54.9$$

$$We = \frac{\rho' V^2 (\Gamma) \tilde{\lambda}_{R-T}}{\sigma}$$

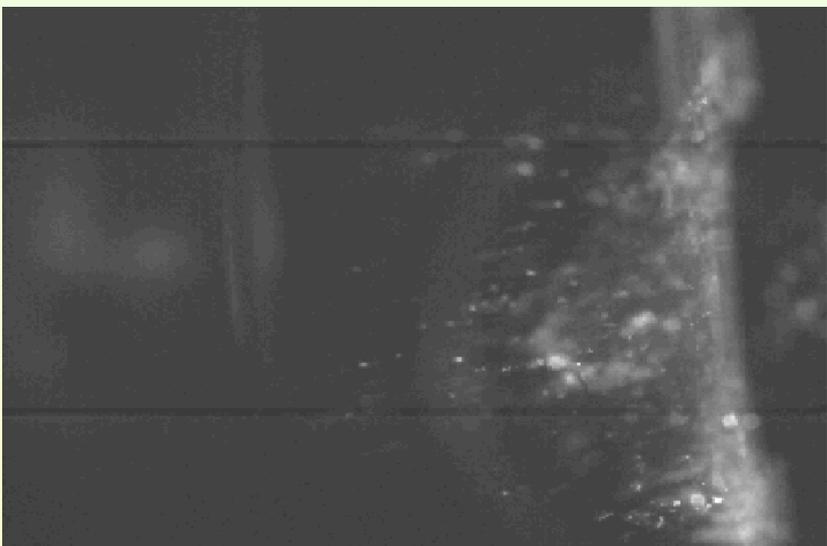
Высокоскоростная видеосъемка. 2000 кадр/с

Взрывное вскипание и распад стекающей пленки при высоких тепловых потоках

$$Re_{вх} = 847, q = 26.1 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$$



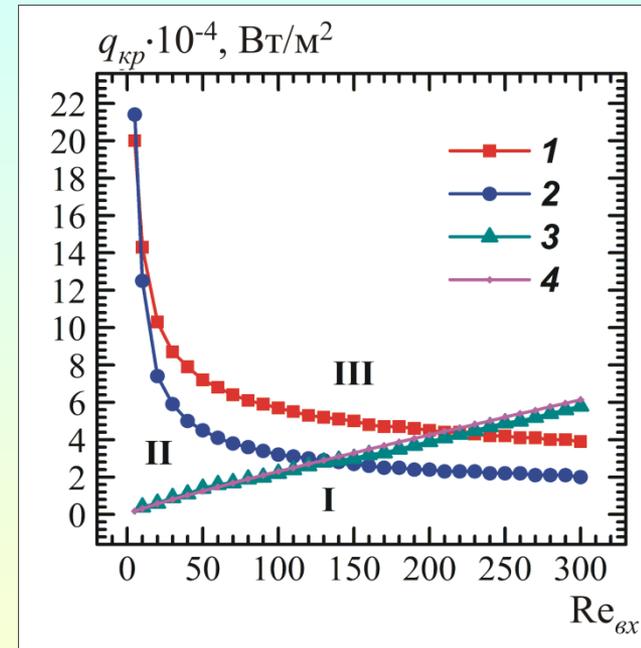
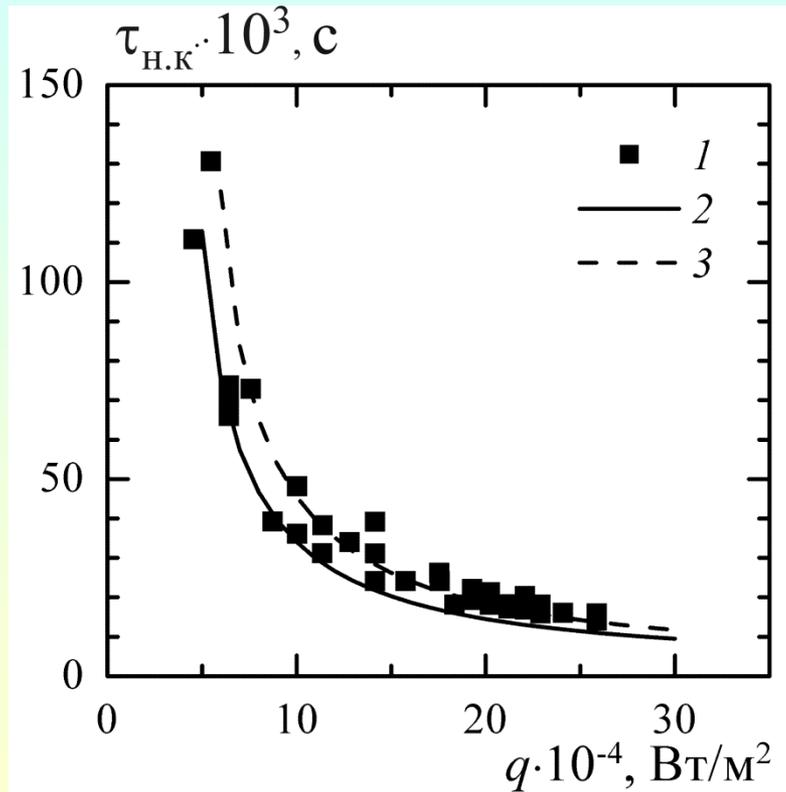
Развитие самоподдерживающегося фронта испарения при ступенчатом тепловыделении



Вид сбоку

Моделирование динамики течения и распада стекающей волновой пленки жидкости при нестационарном тепловыделении. Времена ожидания вскипания и карта режимов распада пленочного волнового течения

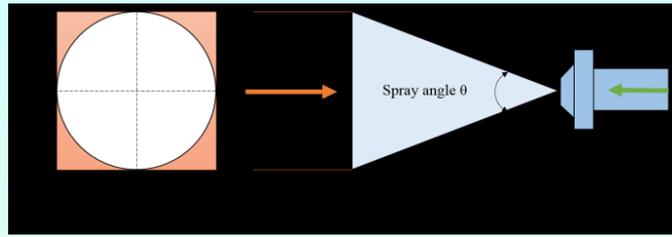
Выполнено совместное решение системы гидродинамических уравнений Капицы-Шкадова и нестационарного уравнения теплопроводности для испаряющейся волновой пленки.



Карта режимов при ступенчатом тепловыделении (азот).

Критические тепловые потоки: 1, 2 — распад стекающей пленки при вскипании жидкости, $\Delta T_{н.к} = 26$ К (1), $\Delta T_{н.к} = \Delta T_{н.к}(q)$ (2), 3 — осушение поверхности в режиме испарения при нестационарном тепловыделении; 4 — расчет критического теплового потока в режиме испарения при стационарном тепловыделении по модели (Павленко, Лель, 1997).

Сравнение расчетных и экспериментальных времен ожидания вскипания при ступенчатом тепловыделении, $Re_{in} = 230$:
1 — Эксперимент (азот); 2 — $\Delta T_{н.к} = 26$ К; 3 — $\Delta T_{н.к} = 32$ К.



Положение форсунки относительно теплоотдающей поверхности.

Кипение жидкости в потоке жидкости модифицированные поверхности (сетчатые покрытия, накладки, изготовленные методом 3D-печати, др.).

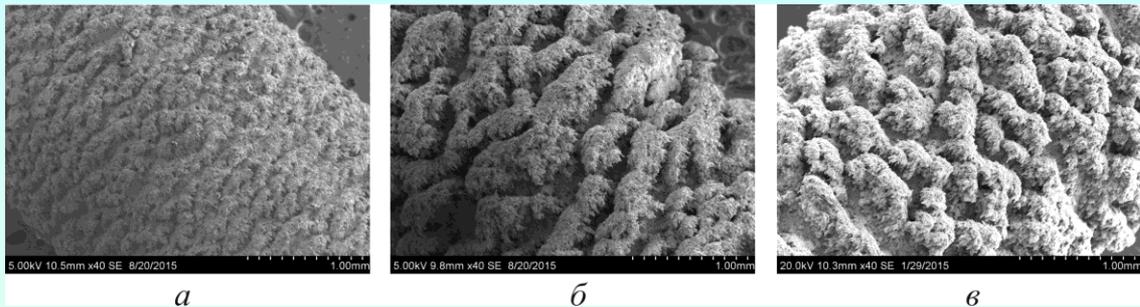


Кипение при распылительном охлаждении является одной из эффективных технологий охлаждения для отвода высоких плотностей теплового потока.

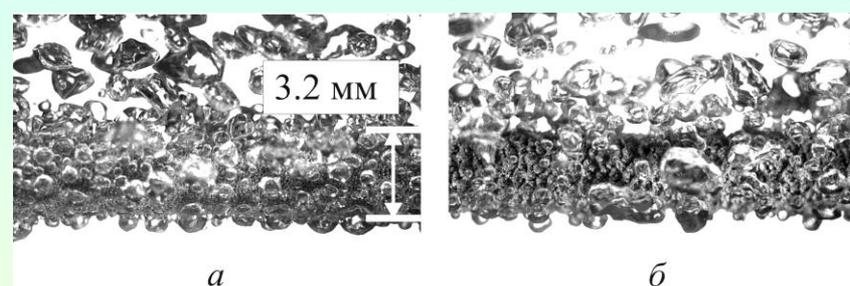
При распылительном охлаждении переохлажденный жидкий хладагент подается из сопла под давлением и распадается на множество вторичных капель, воздействующих на нагретую поверхность, покрытую радиально текущей пленкой.

Струйное охлаждение-это технология, предназначенная для орошения нагревателя струями жидкости/микроструями.

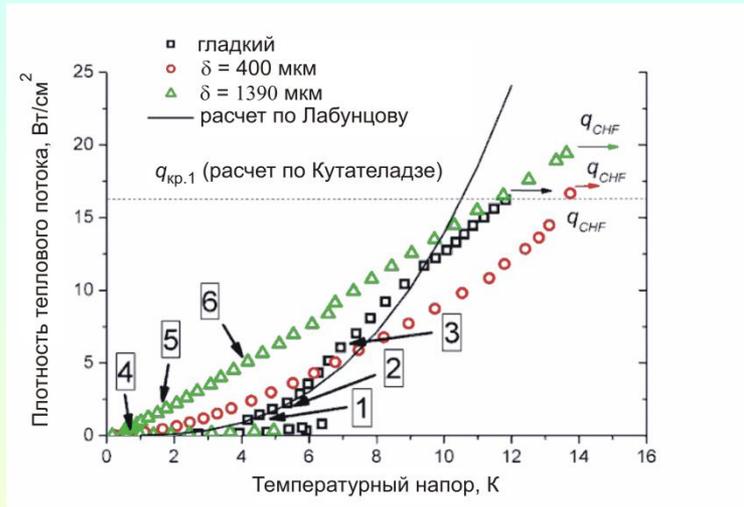
Теплообмен и развитие кризисных явлений при кипении жидкостей на поверхностях с капиллярно-пористыми покрытиями



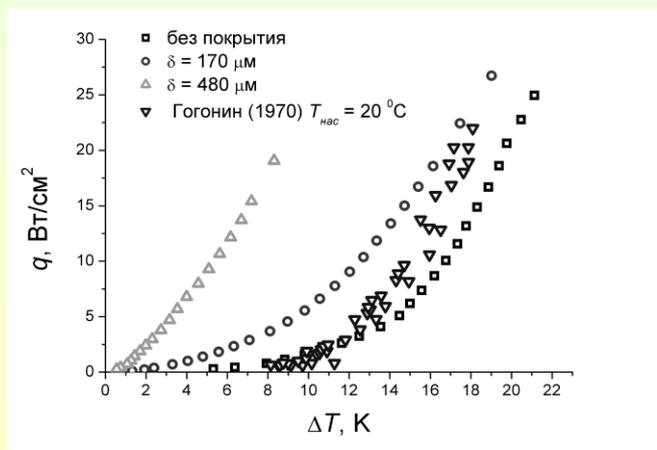
SEM-изображения поверхности нагревателей с напылённым покрытием из бронзы (разработка В.И. Калиты и др., Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН). Толщина покрытия: *а* – 170; *б* - 480; *в* – 500 мкм.



Визуализация кипения на нагревателях с покрытиями толщиной 170 мкм (*а*) и 480 мкм (*б*). Фреон R21, $q = 6.8 \text{ Вт/см}^2$.

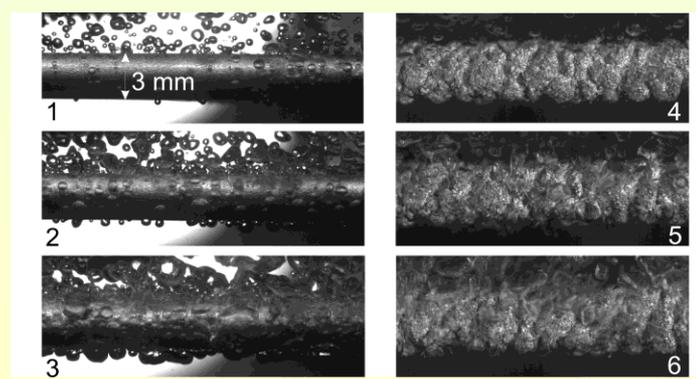


Кривые кипения. Азот.

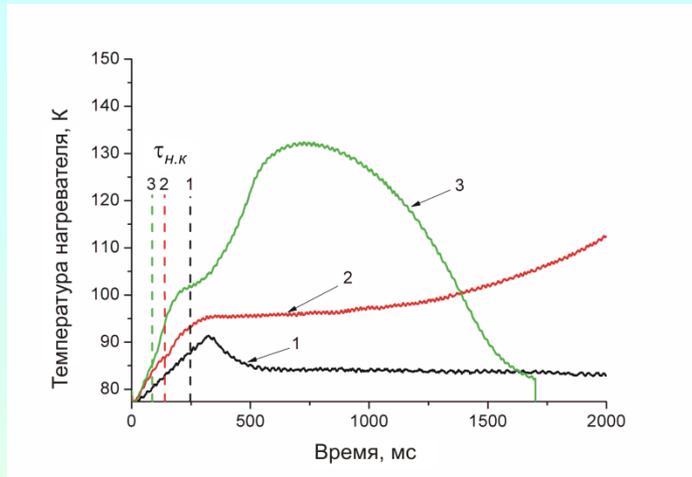


Кривые кипения для поверхностей без покрытия и с покрытиями различной толщины. Фреон R21.

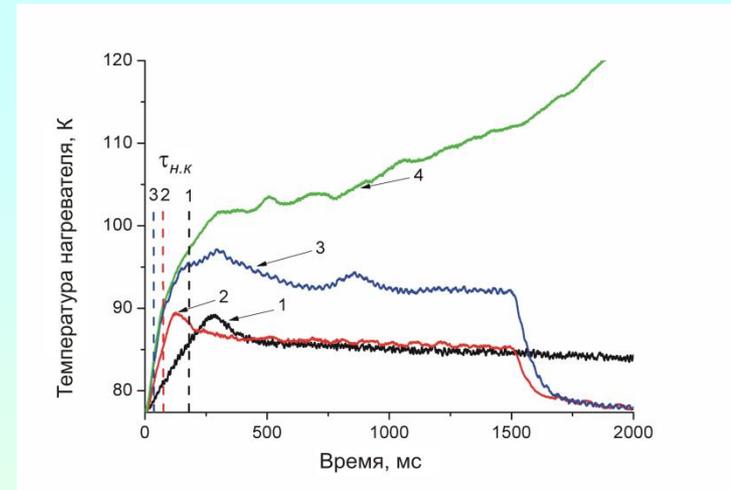
Кадры высокоскоростной видеосъемки пузырькового кипения на гладком нагревателе и нагревателе со структурированным капиллярно-пористым покрытием ($\delta = 1390 \text{ мкм}$) при различных тепловых потоках.



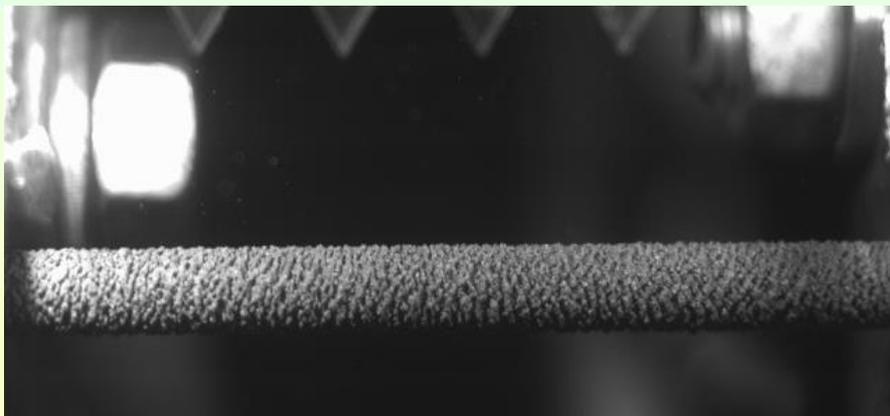
Кризис теплоотдачи при нестационарном тепловыделении на нагревателях со структурированными капиллярно-пористыми покрытиями.



Зависимость температуры поверхности гладкого нагревателя от времени 1 - $q = 7.2$; 2 - 13.5 ; 3 - 20.5 Вт/см².



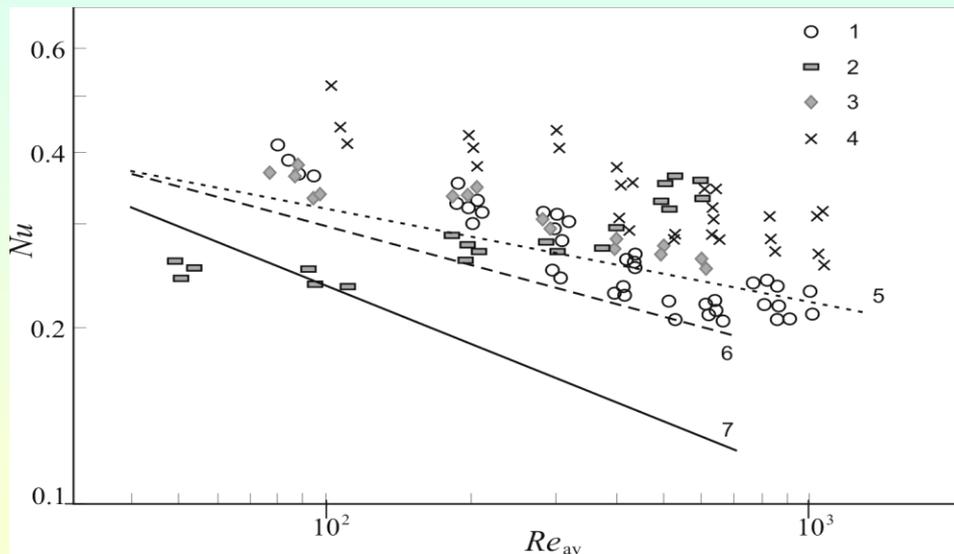
Зависимость температуры нагревателя со структурированным капиллярно-пористым покрытием ($\delta = 400$ мкм) от времени. 1 - $q = 6.0$; 2 - 16.3 ; 3 - 30 ; 4 - $q = 32$ Вт/см².



Развитие самоподдерживающегося фронта испарения на нагревателе со структурированным капиллярно-пористым покрытием ($\delta = 1390$ мкм, $q = 15.9$ Вт/см²). Распространение фронтов испарения в предкризисных режимах происходит только вдоль поперечных каналов структурированного капиллярно-пористого покрытия. Быстрое распространение фронтов испарения вдоль нагревателя отсутствует, что приводит к развитию кризиса кипения и переходу к пленочному кипению при существенно более высоких тепловых потоках.

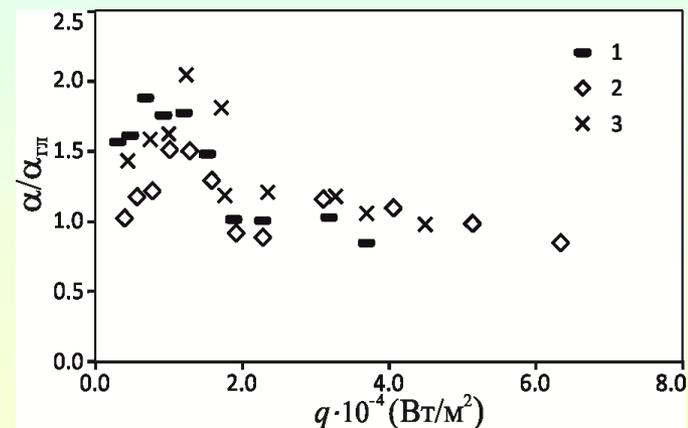
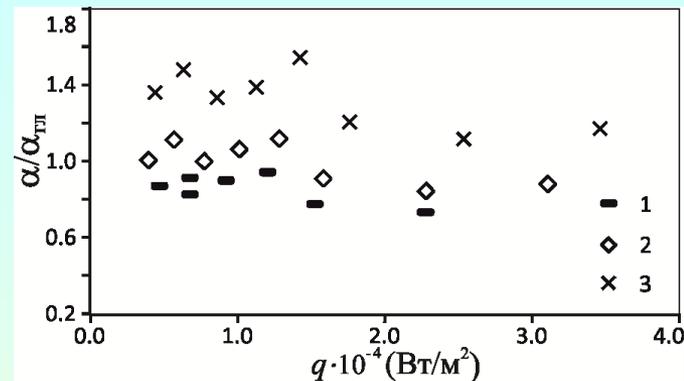
Показано, что на нагревателях со структурированными капиллярно-пористыми покрытиями происходит вырождение развития кризиса кипения при нестационарном тепловыделении при $q < q_{кр.1}$. При нестационарном импульсном тепловыделении на нагревателях с такими покрытиями быстрый переход к плёночному режиму кипения, минуя стадию пузырькового кипения, не наблюдается вплоть до тепловых нагрузок, в 2.5- 3 раза превышающих критический тепловой поток при стационарном тепловыделении.

Интенсификация теплообмена на структурированных поверхностях при испарении в стекающих пленках жидкостей и их смесей



Теплоотдача при испарении пленки смеси R114/R21 на гладкой и структурированных поверхностях. $p = 2\text{--}2.1$ бар.

Экспериментальные данные: 1 – гладкая поверхность, $C_x = (9\text{--}17)\%$; 2 – оребренная поверхность, $C_x = (4\text{--}15)\%$; 3 – ромбовидная текстура, $C_x = 19\%$; 4 – сетчатое покрытие ($C_x = 13\%$). Расчетные зависимости: 5 – корреляция [Alhuseini et al., 1998]; 6 – корреляция [Чжунь, Себан, 1971]; 7 – решение Нуссельта.

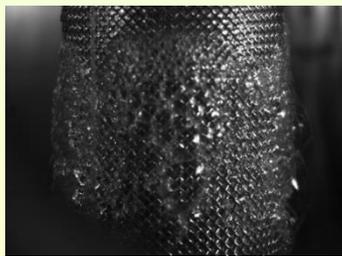
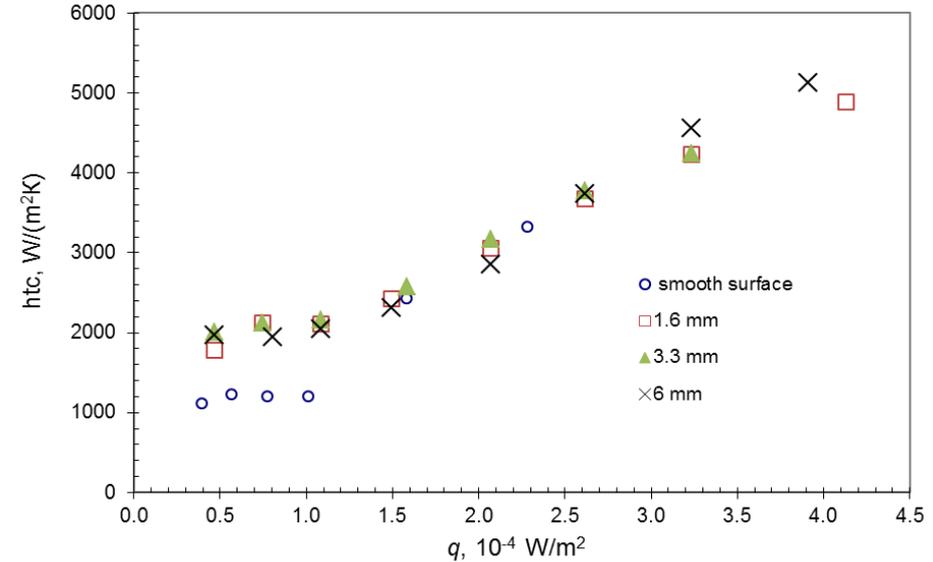
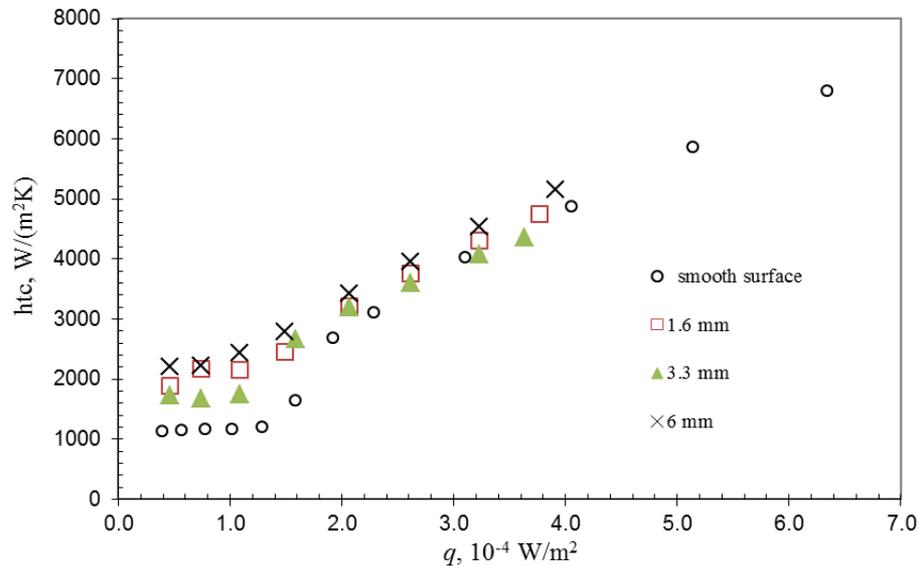


Относительный коэффициент теплоотдачи на структурированных поверхностях. (a) $Re_{пл} = 200$; (б) $Re_{пл} = 640$. 1 – оребренная поверхность; 2 – ромбовидная текстура; 3 – сетчатое покрытие.

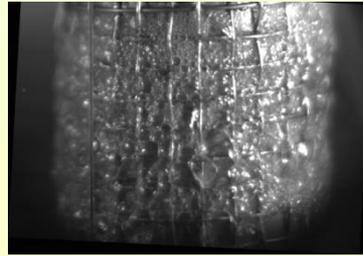
Интенсификация теплообмена при испарении и кипении на поверхностях с сетчатыми конструкциями

Re = 640

Re = 1040



Режим
кипения на
поверхности
с мелкой и
крупной
сеткой



Течение пленки жидкости
на поверхности трубы с сетчатым
покрытием в режиме испарения
(латунь, нержавеющая сталь)



Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Volodin O.A. Heat transfer and critical heat flux at evaporation and boiling in refrigerant mixture films falling down the tube with structured surfaces // **Intern. Journal of Heat and Mass Transfer**. 2015. Vol. 90. P. 149–158.

Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Volodin O.A. Heat transfer and crisis phenomena at the film flows of freon mixture over vertical structured surfaces // **Heat Transfer Engineering**. 2016. Vol. 37, No. 3–4. – P. 257–268.

Микроструктурированные поверхности (метод деформирующего резания)

Структуры поверхности представляют собой оребрение, полученное деформирующим резанием с последующей накаткой прямым накатным роликом по вершинам ребер (патент Зубков Н.Н., 2013). Коэффициенты увеличения площади составили: $K_1, K_2=5,4$.

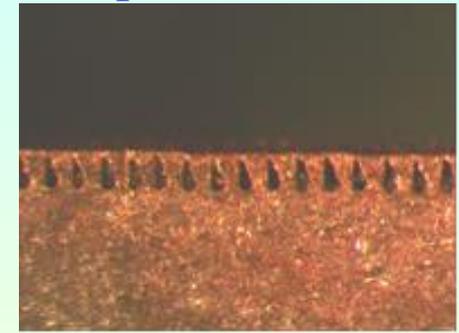
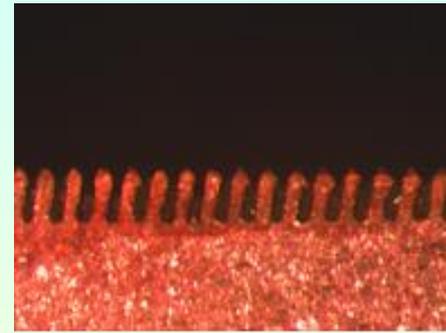
Фронтальный

Разрез по ребрам

Разрез по накатке

Образец №1

Шаг ребер – 100 мкм
Высота ребер – 220 мкм
Шаг накатки – 318 мкм



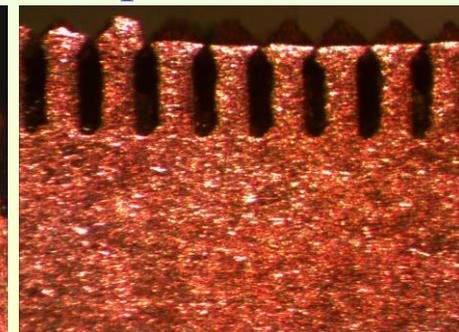
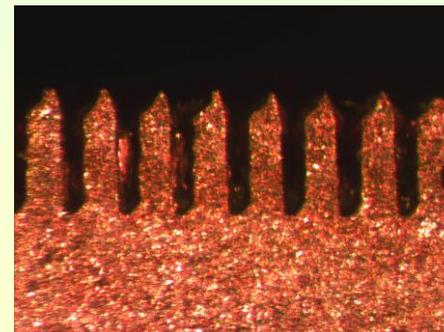
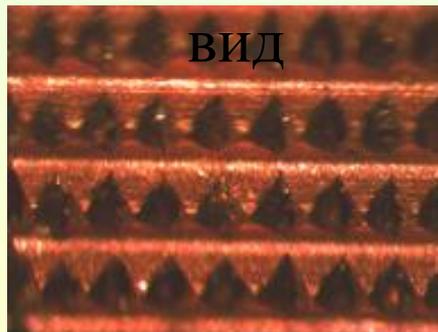
Фронтальный

Разрез по ребрам

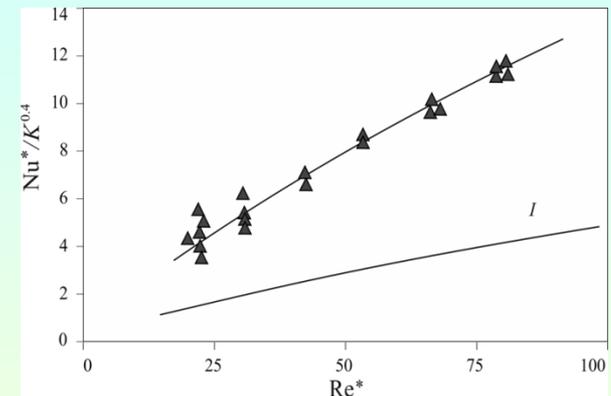
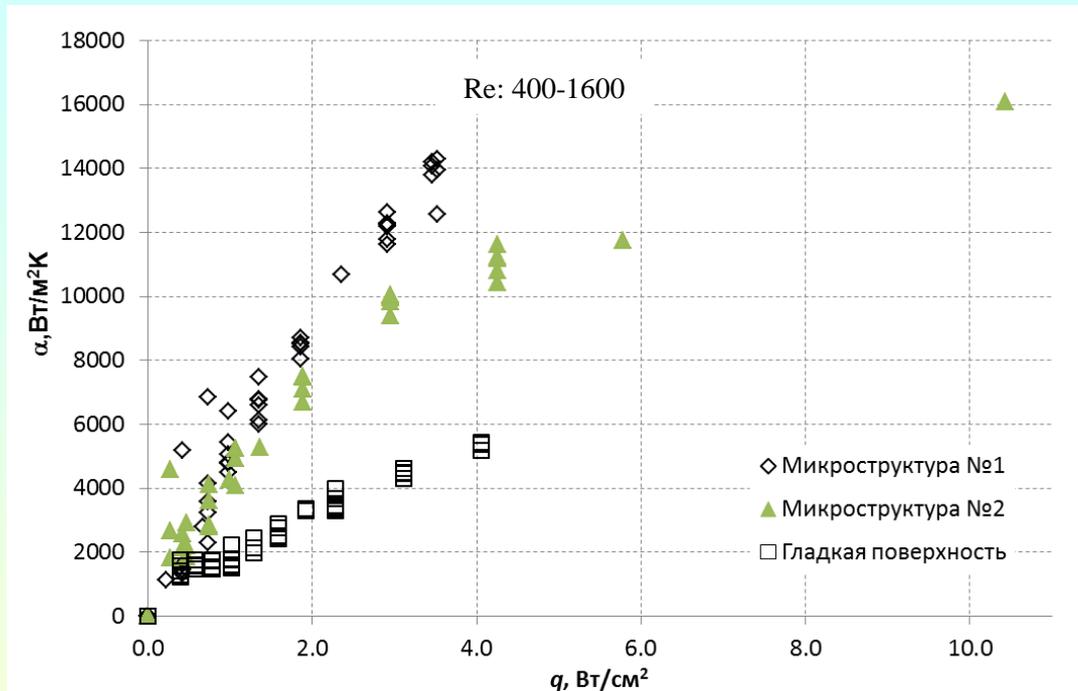
Разрез по накатке

Образец №2

Шаг ребер – 200 мкм
Высота ребер – 440 мкм
Шаг накатки – 318 мкм



Теплообмен при кипении на микроструктурированных поверхностях

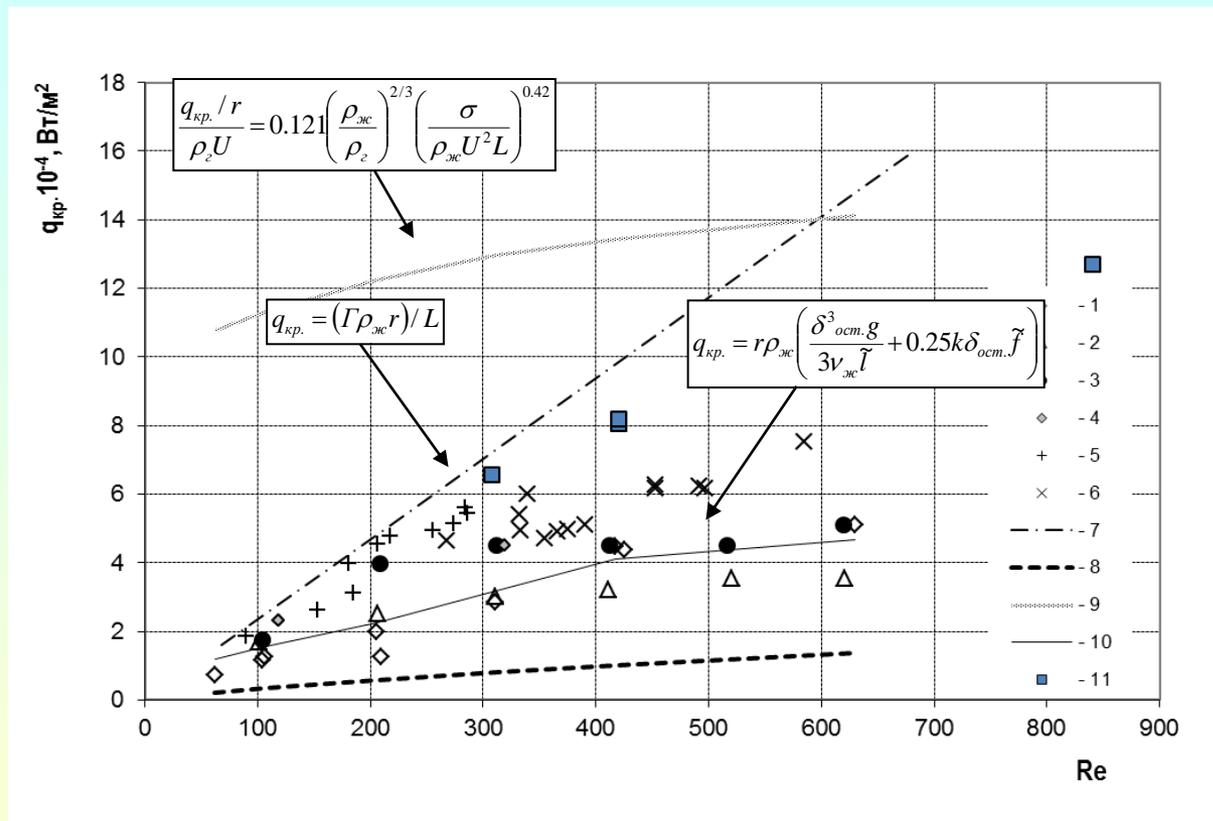


Точки – опытные данные для микроструктуры №1; линия I – расчет по [Гогонин, 2010].

- Коэффициент теплоотдачи (КТО) в режиме кипения на микроструктурированных поверхностях 1, 2 увеличивается до 3-х раз по сравнению с гладкой поверхностью. КТО для микроструктурированной поверхности №1 превышает КТО для структуры №2 вплоть до 20% (в области развитого кипения).

КРИЗИСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ПЛЕНОЧНОМ ТЕЧЕНИИ СМЕСИ ХЛАДОНОВ НА ГЛАДКИХ И СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Зависимость КТП от числа Рейнольдса на входе.



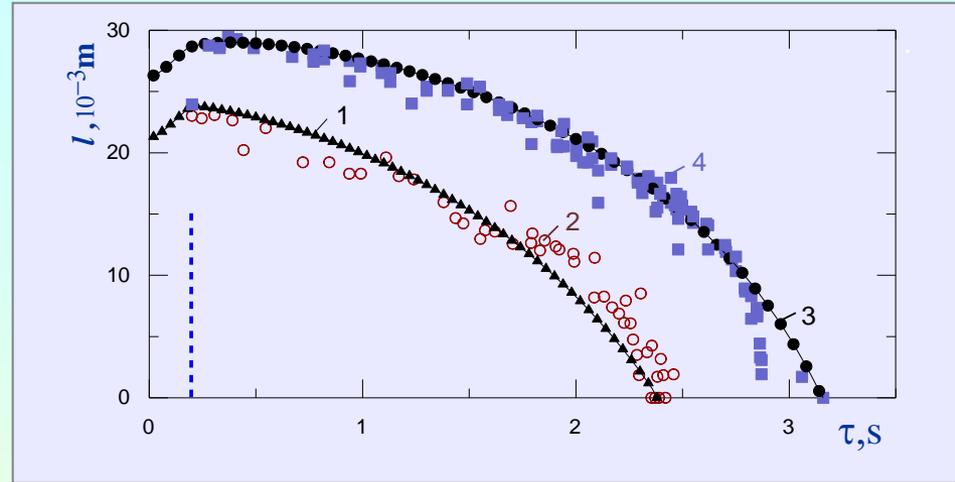
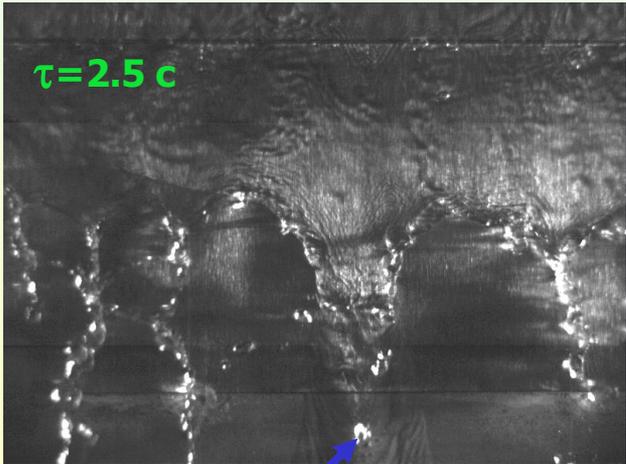
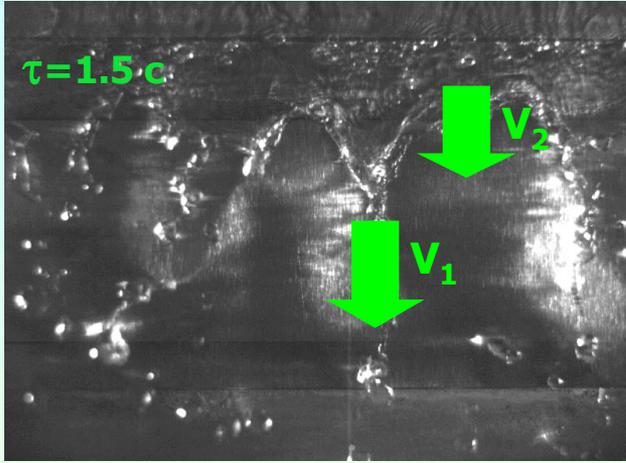
Данные для смесей R21/R114:

1 — гладкая поверхность; 2 — поперечное оребрение; 3 — ромбовидная текстура; 4 — сетчатое покрытие. 5, 6 — данные [Christians M., Thome J.R., 2012] для хладонов R236fa и R134a (Gewa-B5). 7 — тепловой поток, соответствующий полному испарению на выходе.

Расчетные зависимости: 8 — [Ueda et al., 1981], 9 — [Mudawar et al., 1987], 10 — [Pavlenko, Lel, 1997].

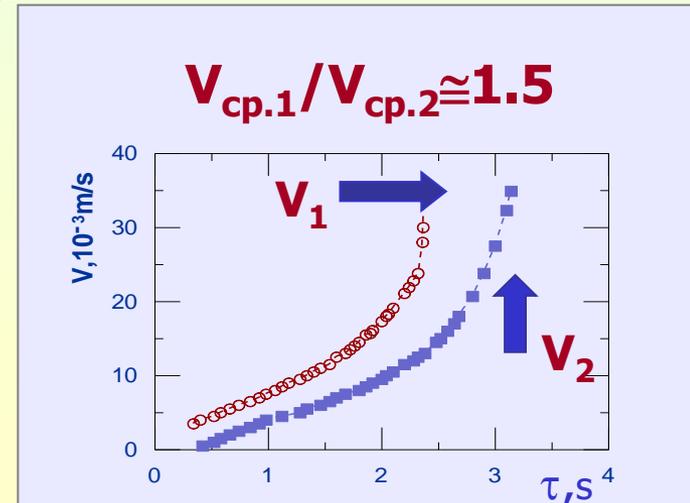
11 — оребрение, полученное деформирующим резанием (Павленко А.Н. и др., 2017).

Динамика повторного смачивания перегретой поверхности при пленочном течении жидкости



Зависимость продольного размера несмоченной зоны от времени. 1, 2 - расчетные и экспериментальные данные в области кипящих струй; 3, 4 - в межструйной зоне в режиме испарения в стекающей пленке.

Распространение фронта повторного смачивания на пластине из константана ($\delta = 25 \cdot 10^{-6} \text{ м}$) при стекании пленки жидкого азота.

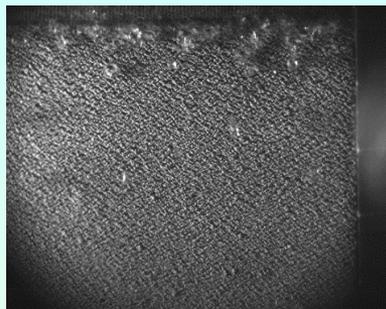


$$R_{\text{хар}} \approx 4 \sqrt{\lambda_{\text{H}} \delta_{\text{H}} / \alpha_{\text{сух.п}}}$$

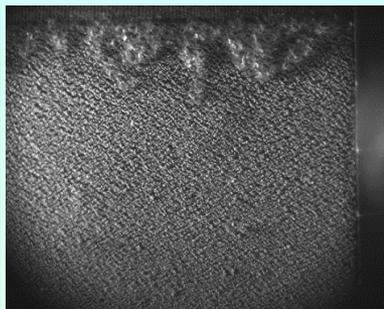
$$Re_{\text{вх}} = 1693, T_{\text{нач}} = 700 \text{ К.}$$

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ СИЛЬНО ПЕРЕГРЕТЫХ ТЕЛ СТЕКАЮЩЕЙ ПЛЕНКОЙ ЖИДКОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРУКТУРИРОВАННЫХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ (ПЛАЗМЕННОЕ НАНЕСЕНИЕ) ИЛИ НИЗКОТЕПЛОПРОВОДНЫХ ПОКРЫТИЙ

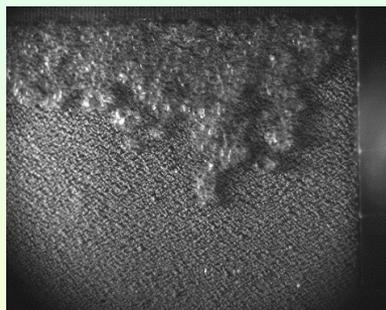
Процесс повторного смачивания. Нагреватель со структурированным капиллярно-пористым покрытием.



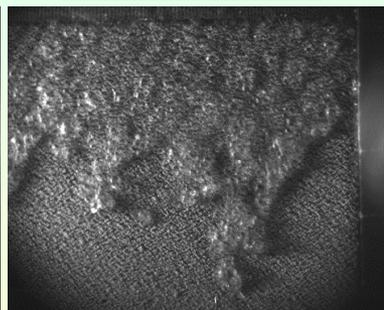
(1) 1005 мс; 124 К



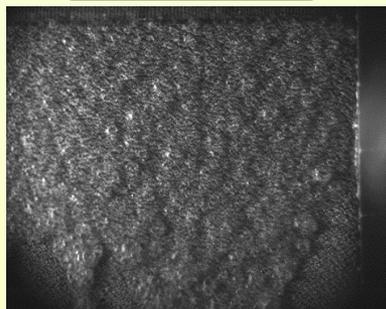
(2) 2402 мс; 114 К



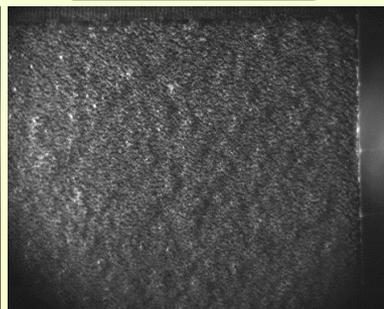
(3) 4202 мс; 99 К



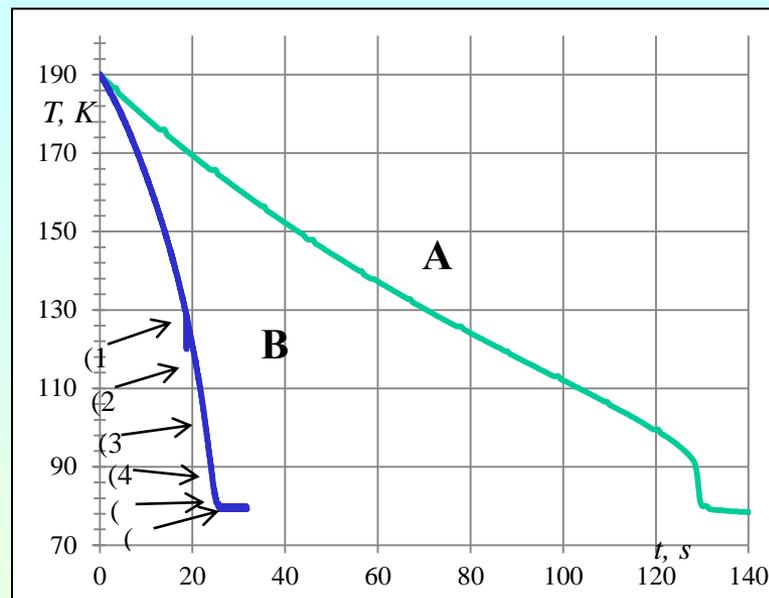
(4) 5702 мс; 86 К



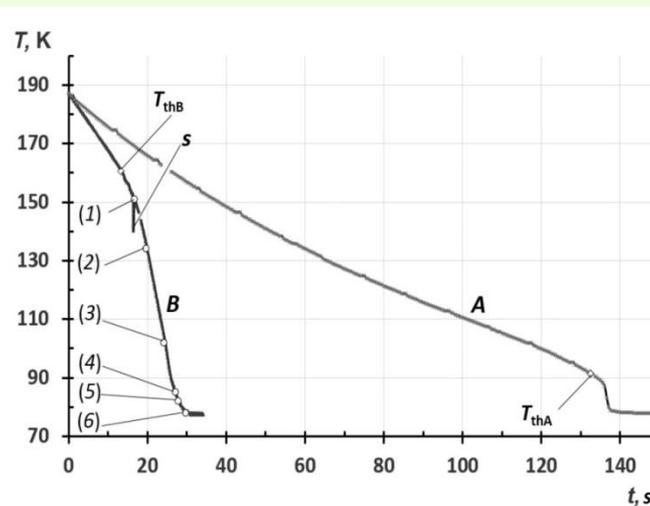
(5) 7029 мс; 80 К



(6) 7802 мс; 79 К

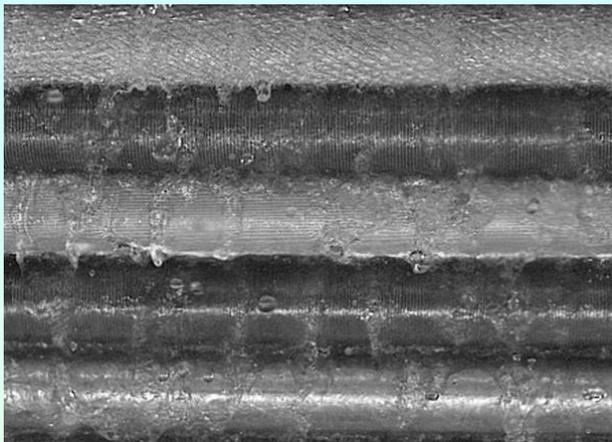


$Re = 500$. Азот. А – медная пластина, В – медная пластина со структурированным капиллярно-пористым покрытием.

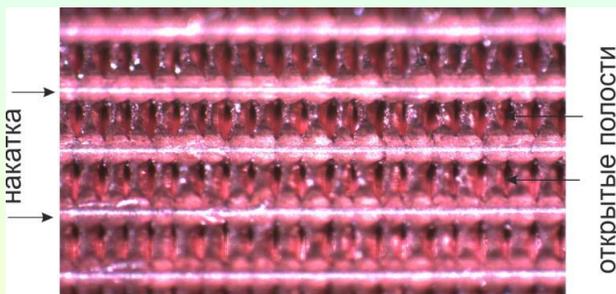


$Re = 500$. Азот.
А – медная пластина,
В – медная пластина с низко теплопроводным покрытием.

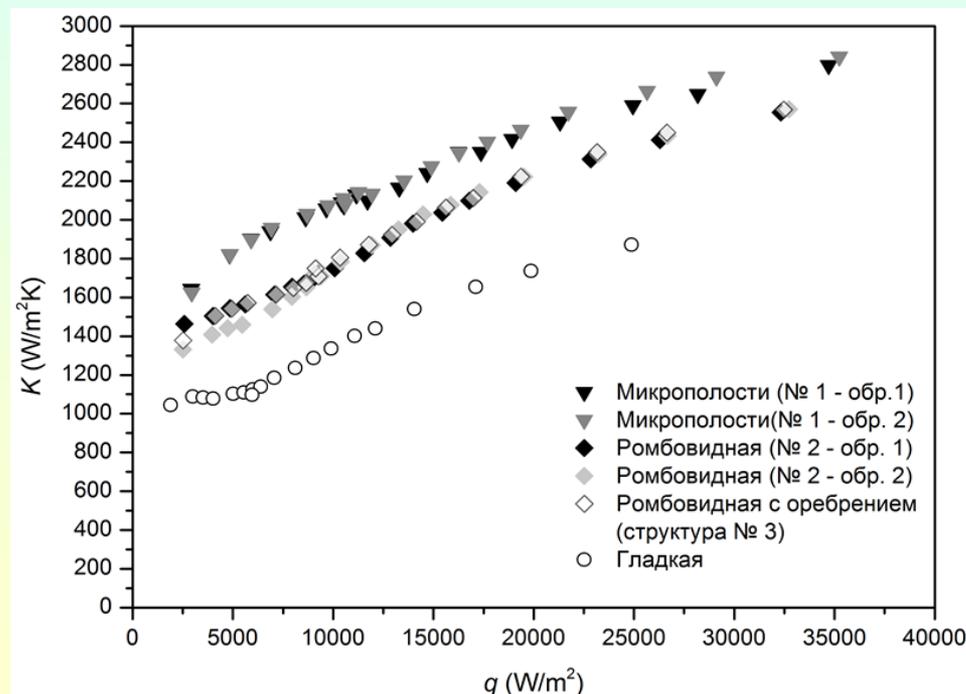
Интенсификация теплообмена в стекающих пленках на пакете горизонтальных труб с микроструктурированными поверхностями различных типов



Течение пленки хладона R21 по экспериментальным трубам пакета (режим кипения), $Re = 600$.



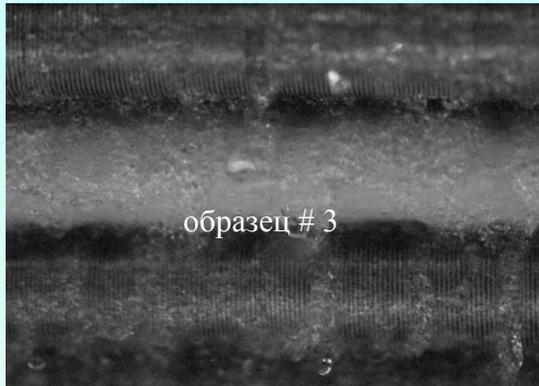
Рабочие участки со структурированной поверхностью



Коэффициент теплопередачи в зависимости от теплового потока

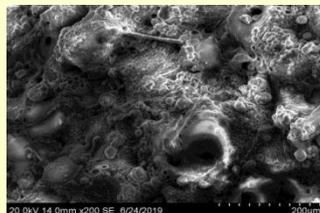
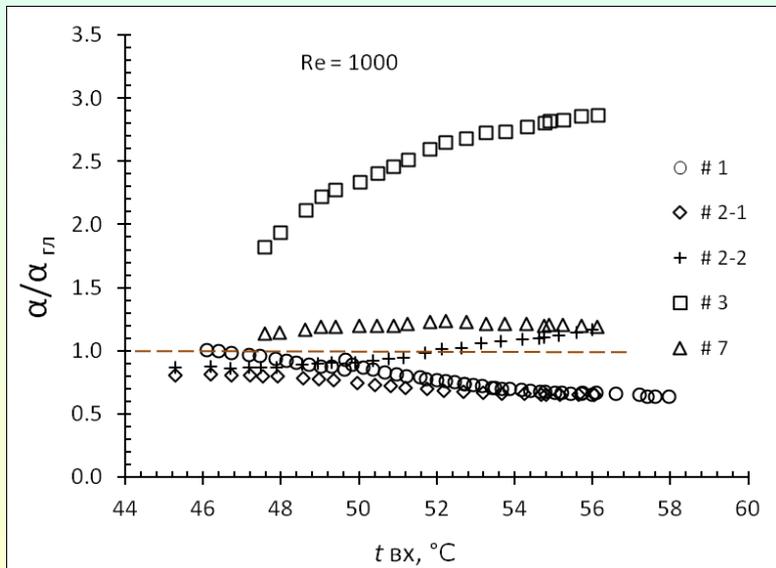
Влияние характеристик МДО-покрытий (метод микродугового оксидирования) на интенсификацию теплообмена в стекающей пленке на пакете труб.

Труба Д16Т с МДО-покрытием толщиной ≈ 30 мкм.
Электролит: КОН + жидкое натриевое стекло.

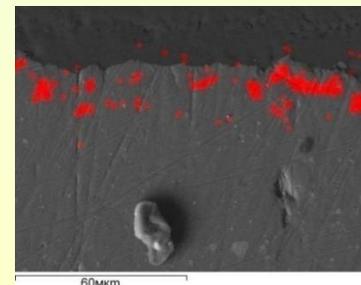


Важнейшим результатом исследований является демонстрация того, что применение данного эффективно реализуемого на практике метода микроструктурирования протяженных теплоотдающих поверхностей позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи примерно в три раза, что не уступает по теплообменным показателям традиционным и существенно более дорогостоящим способам интенсификации теплообмена при кипении.

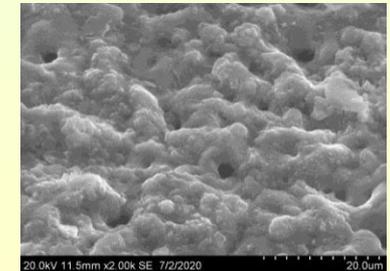
С учетом практической возможности создания МДО-методом масштабных по площади прочных и износостойких покрытий показано, что данная технология нанесения покрытий на пакеты алюминиевых труб весьма перспективна для производства крупномасштабных спирально-витых теплообменников, предназначенных, в частности, для ожижения природного газа.



Образец # 3,
 $\delta \approx 60$ мкм

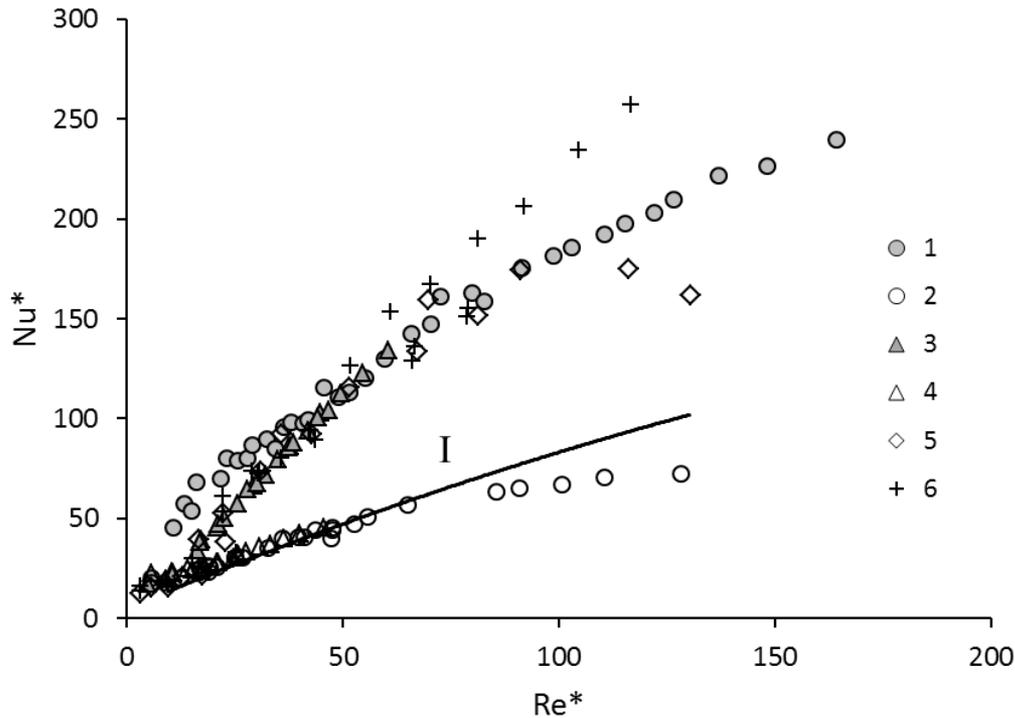


поперечное сечение



поверхность

Обобщение данных по интенсификации теплообмена на модифицированных поверхностях в стекающих пленках жидкости



- 1 – микротекстура с полужакрытыми полостями;
- 2 – гладкая медная труба;
- 3 – МДО-покрытие толщиной 30 мкм;
- 4 – гладкая труба: D16T;
- 5 – вертикальный медный цилиндр с микротекстурой, Re = 100, IJNMT, (2020);
- 6 – вертикальный медный цилиндр с микротекстурой, Re = 300-360, IJNMT, (2020);
- I – расчет по модели Гогонина, J. Eng Phys and Thermophys (2010).

$$Nu^* = 0.01 Re^{*0.8} Pr^{1/3} b K^{0.4} \left(\frac{\lambda_c \rho'}{\lambda_w c_w \rho_w} \right)^{-0.2} \bar{k}$$

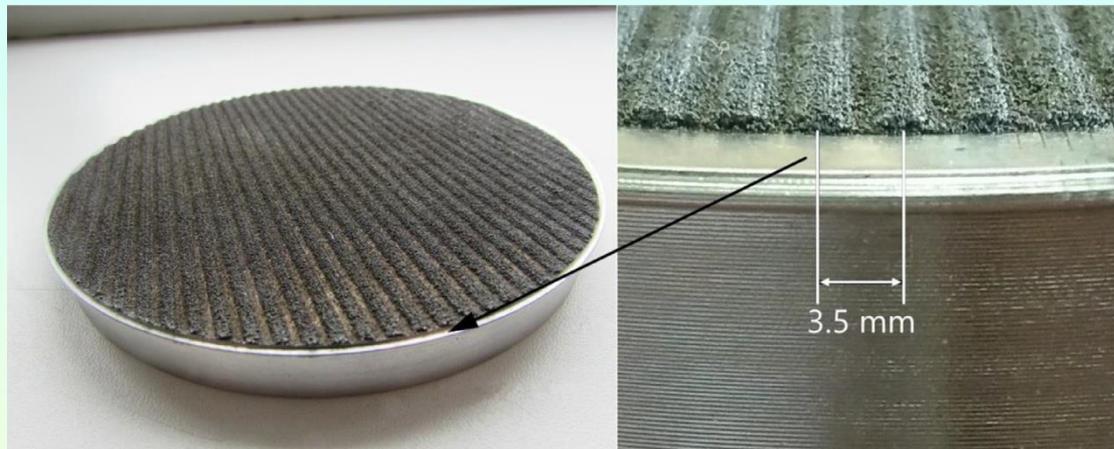
$$Nu^* = \frac{hl_\sigma}{\lambda} \quad Re^* = \frac{ql_\sigma}{r\rho''\lambda} \quad K = \frac{(r\rho'')^2 l_\sigma}{c_p T_s \rho' \sigma}$$

Интенсификация теплообмена в режиме развитого пузырькового кипения на МДО-покрытиях сравнима или несколько выше, чем на горизонтальных трубах с микроорезблением, создаваемым методом микродеформируемого резания.



МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ КАПИЛЛЯРО-ПОРИСТЫЕ ПОКРЫТИЯ

(лазерная система 3D-синтеза: аддитивная технология 3-печати)

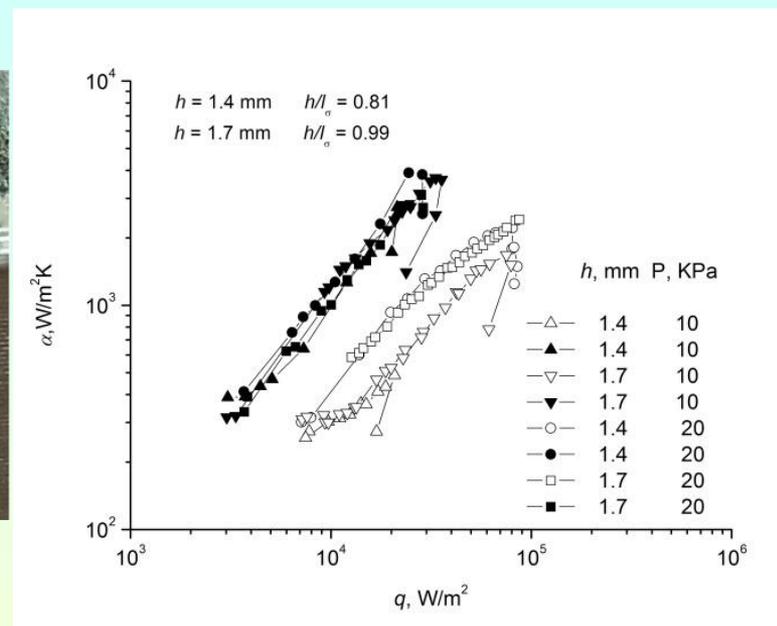


Тепловыделяющая поверхность с
микроструктурированными капиллярно-пористыми
покрытиями

(покрытия из меди, бронзы, нержавеющей стали).

Эксперименты: криогенные жидкости, фреоны, вода.

Области приложения: термосифоны, тепловые трубы



Зависимость коэффициента теплоотдачи от
плотности теплового потока . Кипение в тонком
горизонтальном слое додекана.
Темные символы соответствуют поверхности с
микроструктурированным капиллярно-пористым
покрытием, светлые- гладкая поверхность без
покрытия.

Zhukov V.I., Pavlenko A.N. *Heat transfer and critical phenomena during evaporation and boiling in a thin horizontal liquid layer at low pressures* // Intern. Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 117, February 2018. P. 978–990.

Zhukov V.I., Pavlenko A.N. *The effect of pressure on heat transfer at evaporation/boiling in a thin horizontal liquid layer on a microstructured surface produced by 3D laser printing* // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 163. 14 p.



Исследование гидродинамики и массообмена при разделении смесей в структурированных канальных системах в крупномасштабной модели дистилляционной колонны

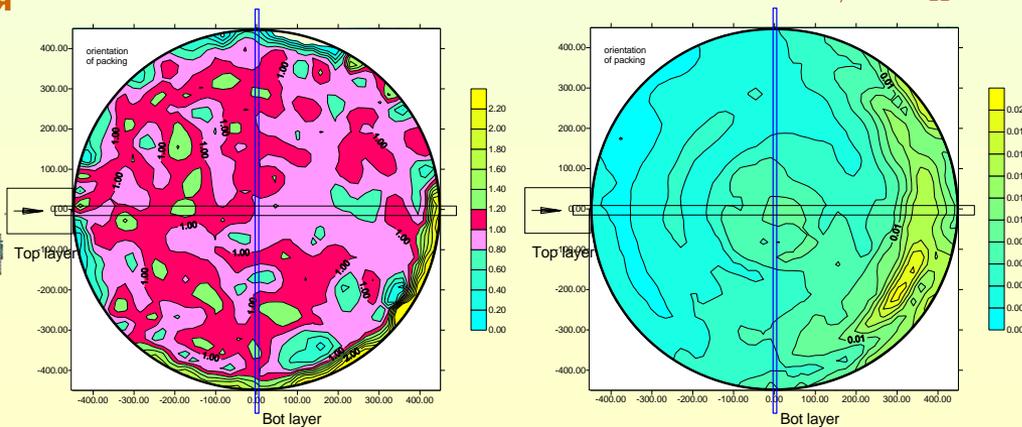
Основные параметры:

- диаметр колонны – 0.9 м; варьирование высоты насадки –4 м
- рабочие жидкости – фреон R21 и R114
- независимое изменение расходов жидкости и пара в диапазонах: жидкость - $1.2 \div 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; пар – $0.1 \div 0.25 \text{ м}^3/\text{с}$ ($P_{\text{макс}}=800 \text{ кВт}$)
- варьирование параметров орошения жидкостью
- Широкий набор методик измерения распределения локальных параметров потоков

Особенности процесса: отрицательная стратификация плотности пара при вынужденном восходящем течении:

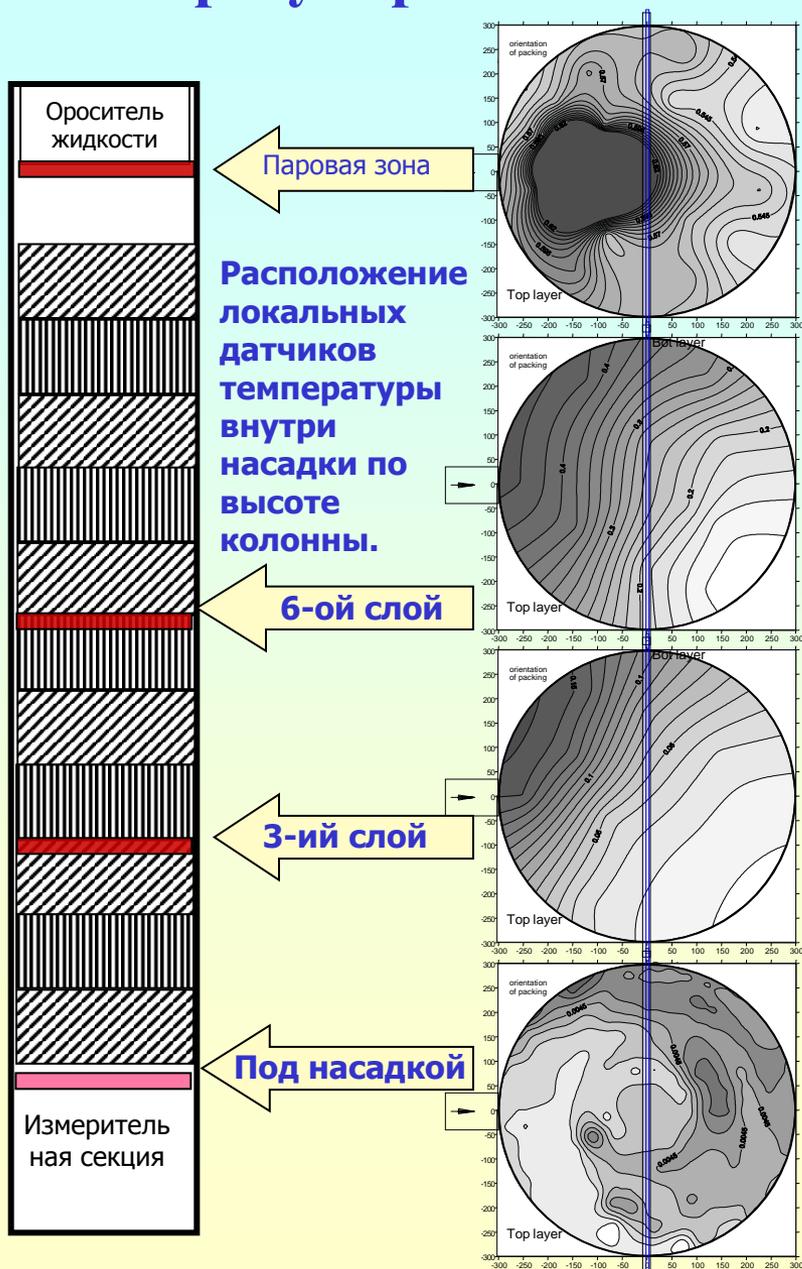
$Ar/Re_{\Pi}^2 > 1$.

Уникальная экспериментальная установка, не имеющая аналогов в мире.

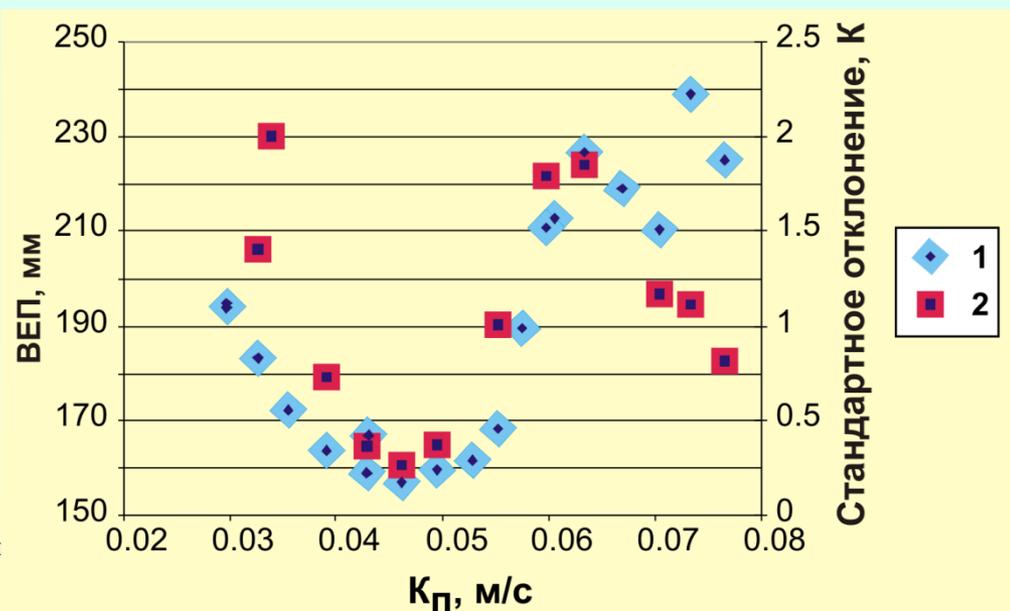


Распределение локальных расхода и концентрации низкокипящего компонента в жидкости по сечению регулярной насадки

Распределение локальных параметров потоков по высоте регулярной канальной системы при противотоке



Взаимосвязь эффективности разделения смесей в насадке и неравномерности распределения потоков по сечению колонны.



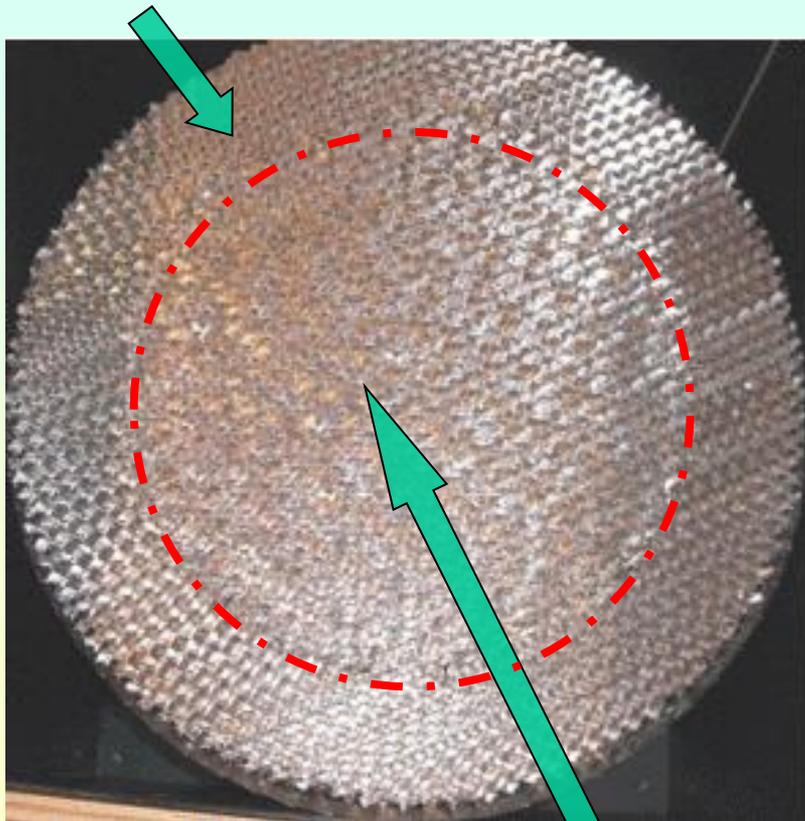
1 – Зависимость ВЕР от приведенной скорости пара
2 – степень неравномерности распределения температуры по сечению в средней по высоте части насадки.

Исследование массообмена в регулярных канальных системах смешанного типа.

Практическая реализация идеи создания комбинированных насадок с различным гидравлическим сопротивлением для повышения производительности колонн.

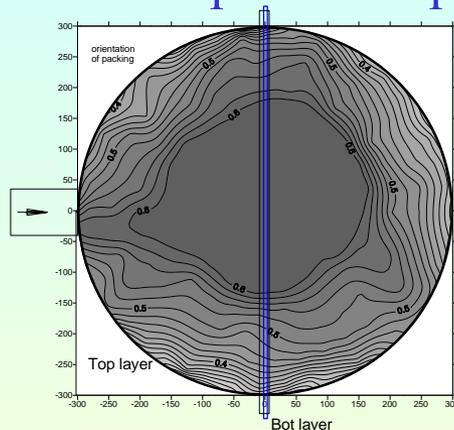
Повышение равномерности распределения локального расхода жидкости по сечению при высоких скоростях пара.

Тип 1

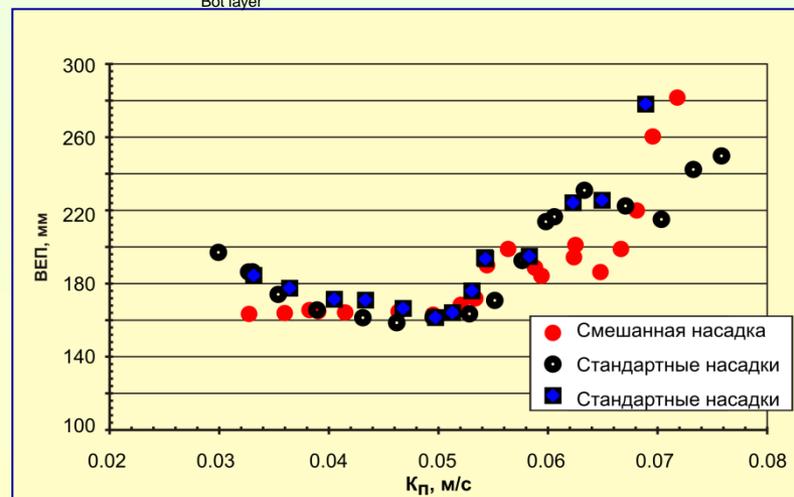


Насадка со смешанным гидравлическим сопротивлением.

Тип 2

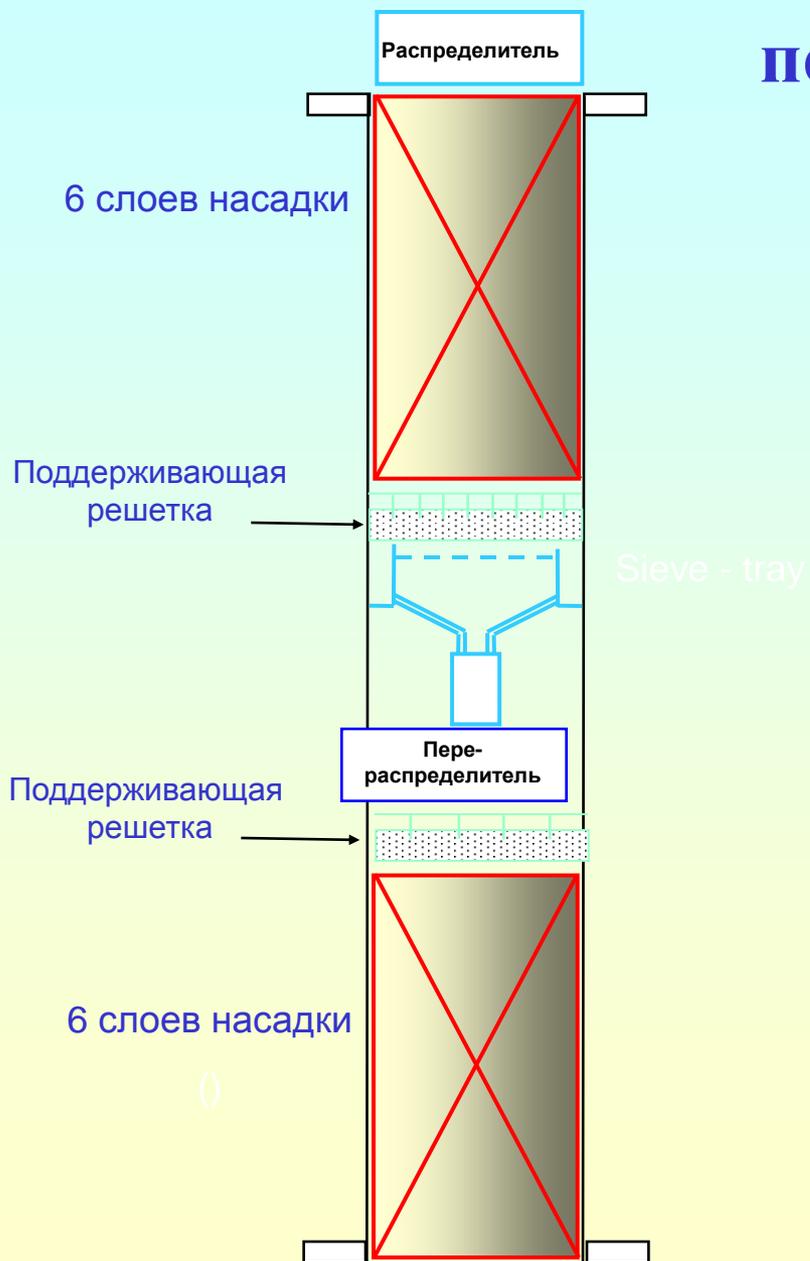


Топограмма распределения локального расхода жидкости по сечению на выходе из насадки $K_v = 0.0665$ м/сек.



Эффективность разделения смесей на насадке смешанного типа.

Влияние комбинированных перераспределителей жидкости и пара на эффективность разделения смесей

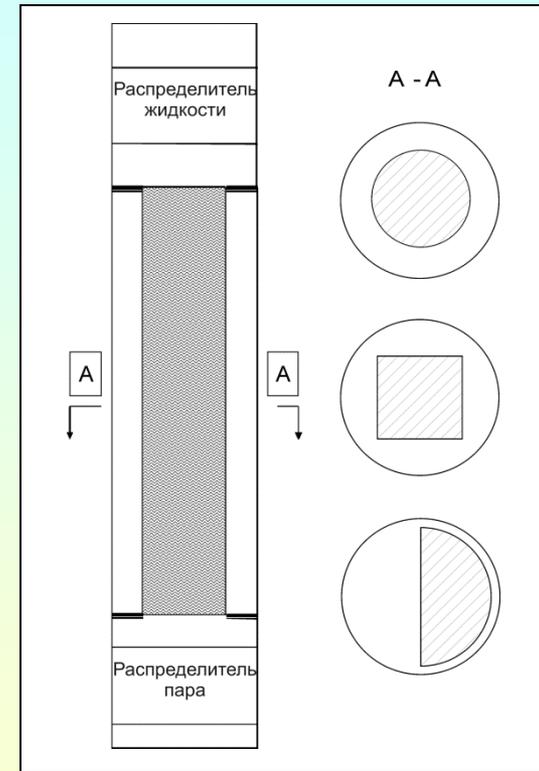
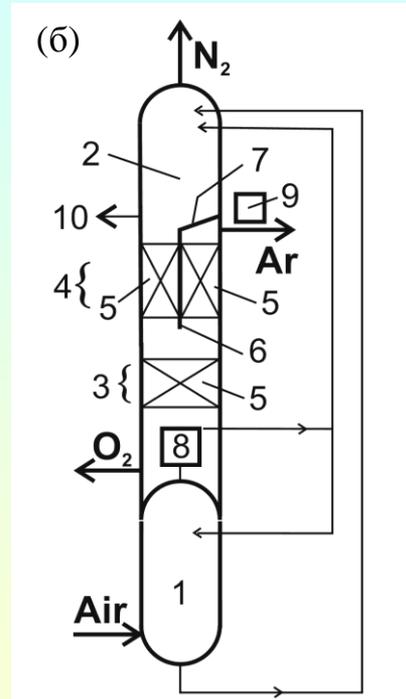
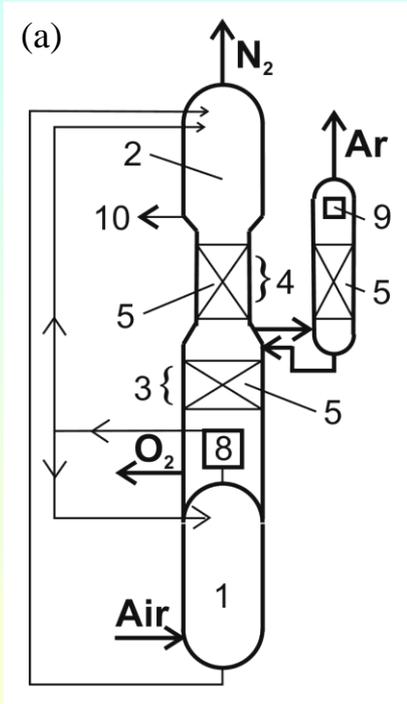


Исследовано влияние промежуточных перераспределителей жидкости и пара различной конструкции на распределение параметров потоков в канальных системах.

Показан положительный эффект использования комбинированных перераспределителей жидкости и пара на эффективность работы дистилляционных колонн.



Исследование эффективности массообмена в колоннах некруговой геометрии. Возможность встраивания дополнительных (аргоновых) колонн в основной корпус криогенной разделительной колонны.

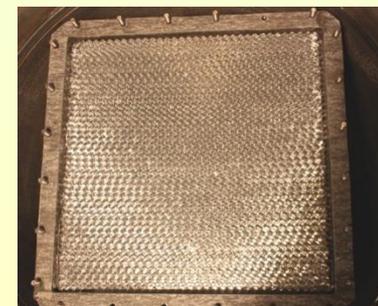


Схематические диаграммы типичной криогенной разделительной (а) и альтернативной колонн (DWC- с разделяющей стенкой в едином корпусе) (б) при криогенной дистилляции воздуха для получения азота, кислорода и аргона.

1- колонна высокого давления; 2- колонна низкого давления;

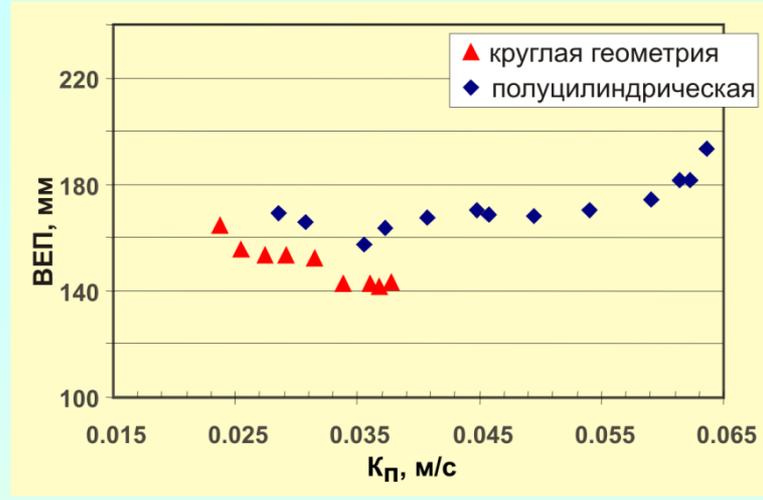
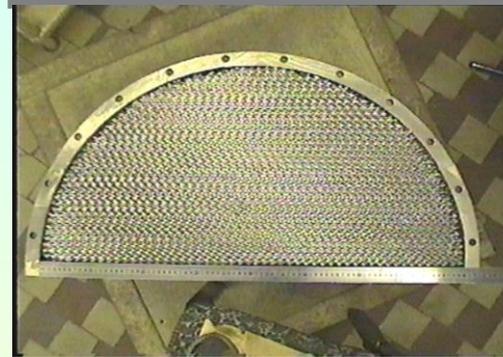
3- нижняя секция колонны низкого давления; 4- верхняя узкая секция

колонны низкого давления; 5- структурированные насадки; 6- разделительная стенка; 7- глухая стенка; 8, 9- конденсаторы; 10- поток отходов.



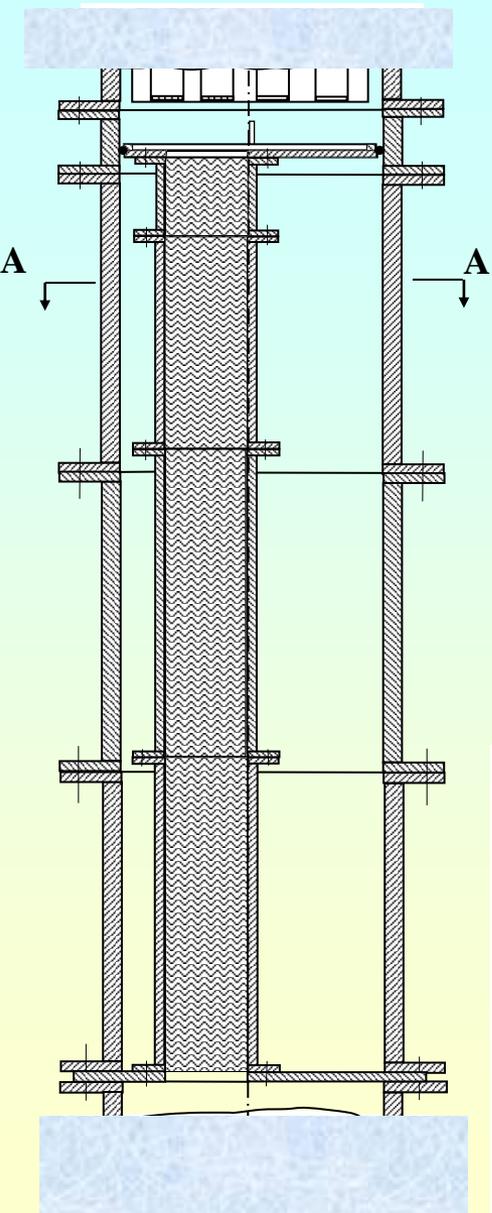


Полуцилиндрическая колонна

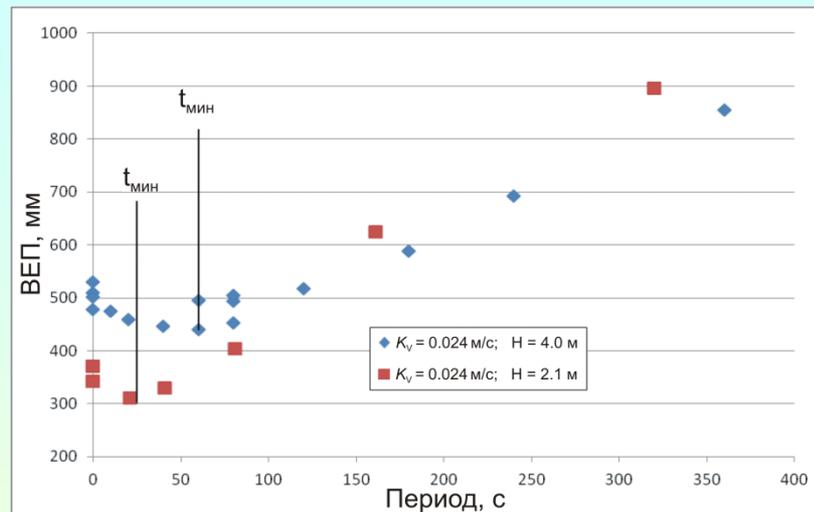


Сравнение эффективности разделения смесей в круглой и полуцилиндрической для различных насадок при различных приведенных скоростях пара.

Получены уникальные экспериментальные данные по сопоставлению эффективности разделения смесей и гидравлическим потерям в крупномасштабных колоннах некруговой геометрии с различными структурированными насадками при варьировании режимных параметров и высоты насадок. Выявлены структурированные насадки, для которых эффективность разделения смесей не снижается в крупномасштабных колоннах с **полуцилиндрической или квадратной формами поперечного сечения в сравнении с круглыми колоннами. Эти опытные данные имеют безусловный научный приоритет в мире и служат весьма важной и необходимой базой при создании новых высокоэффективных дистилляционных колонн для разделения многокомпонентных смесей (так называемых отдельных колонн - columns with divided walls (DWC)).**



Новый метод повышения эффективности разделения смесей при дистилляции на структурированных насадках в крупномасштабных колоннах

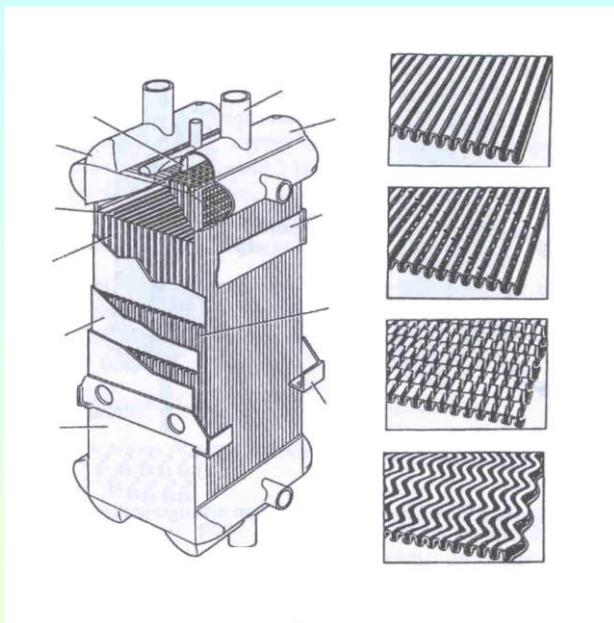


Зависимость эффективности разделения смеси от длительности периодического последовательного орошения различных зон структурированной насадки.

Получены новые результаты по закономерностям противоточного течения двухфазного потока при разделении смесей в сложных канальных системах. Впервые предложен, разработан и протестирован метод динамически управляемого орошения структурированной насадки жидкостью для разрушения крупномасштабных стационарных зон неравномерности распределения локальных расходов, температуры и концентрации по сечению. Исследованы динамика, параметры противоточного течения и эффективность разделения смесей при частичном или полном периодическом последовательном блокировании точек орошения различных зон поперечного сечения насадки, при стационарном блокировании выделенных точек орошения при управлении степенью неравномерности распределения параметров потоков с учетом обратной связи. Выявлены оптимальные частотные характеристики нестационарного орошения жидкостью массообменной поверхности, при которых достигается максимальное увеличение эффективности разделения смесей при различных расходных характеристиках.

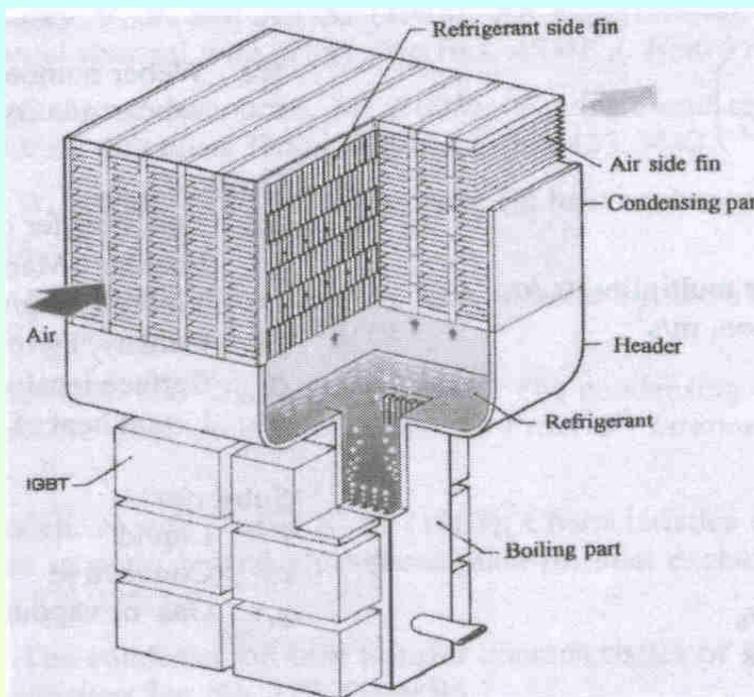
Гидродинамика парожидкостного потока криогенной жидкости в миканалах

Компактные теплообменники с двухфазными потоками для криогенной техники.



Пластинчато-ребристые
Теплообменники

Типы
ребер

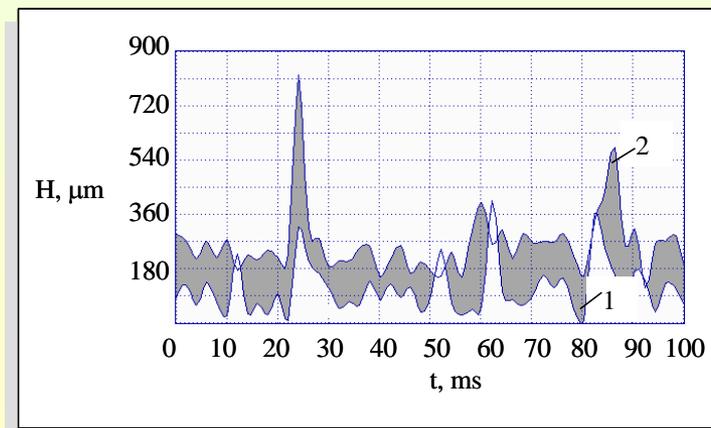


Система для
охлаждения
электронных
устройств при
высоких
тепловых
потоках



$$Re_L = 500,$$
$$Re_v = 15000$$

Фото
поперечного
сечения
канала.



Профиль
толщины
плёнки
жидкости
1- широкая
сторона
2 – узкая
сторона.

Внедрение результатов прикладных работ и исследований (РФ):

Полученные под руководством и с участием А.Н. Павленко результаты исследований по интенсификации теплообмена находят широкое практическое применение, в частности, инженерно-внедренческий центр "Инжехим" (г. Казань) в своей производственной деятельности плодотворно использовал рекомендации научного коллектива, возглавляемого А.Н. Павленко, при разработке, проектировании и создании интенсифицированных тепло- и массообменных насадочных колонн со структурированными насадками, высокоэффективных компактных теплообменных аппаратов, при внедрении импортозамещающего оборудования и внутренних устройств модернизированных аппаратов на различных предприятиях РФ (на АО «Тобольскнефтехим», АО «Нижнекамскнефтехим», АО «Казаньоргсинтез» и др.).

Конкретный экономический эффект от внедрения результатов данной работы по оценкам составляет более 3 млрд. руб.

В настоящее время под руководством Павленко А.Н. в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН проводится ряд крупных прикладных работ и исследований:

❖ по разработке энергетического оборудования с использованием высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) --

в составе консорциума с МАИ (крупный научный проект Минобр РФ- «Разработка фундаментальных основ расчета и принципов построения энергетических систем, основанных на эффекте сверхпроводимости», 2020-2022 гг.);

❖ по разработке криогенной техники для космических приложений -- в рамках договора с Омским государственным техническим университетом (ОмГТУ) по теме «Исследование процессов испарения жидкостей в топливных баках ракет-носителей для повышения экологической безопасности и экономической эффективности ракет-носителей с жидкостными ракетными двигателями» (2020-2021 гг.);

❖ в рамках создания систем охлаждения в микроэлектронике с использованием режима кипения в потоке жидкостей

Павленко А.Н. является лауреатом:

**Международной премии имени академика
А.В. Лыкова (НАН Беларуси, 2020 г.),**



**академика С.С. Кутателадзе
(Президиум СО РАН, 1998 г.);**



**имеет Почетную грамоту и Благодарности Президента РАН
(1999 г., 2007 г.), губернатора Новосибирской области (2019 г.),
Почетные грамоты Президиума СО РАН (2009 г., 2019 г.),
Почетную грамоту мэрии г. Новосибирска (2009 г.), Диплом
лауреата как лучшему руководителю научного подразделения
ИТ СО РАН (1998 г.),**

**награжден медалью мэрии г. Новосибирска
"За труд на благо города" (2013 г.),
Почетной грамотой губернатора Новосибирской
области (2020 г.).**

Список основных публикаций чл.-корр. РАН А.Н. Павленко в рецензируемых журналах

Наиболее значимые работы (2014-2021 гг.):

- Pavlenko A.N., Zhukov V.E., Pecherkin N.I., Chekhovich V.Yu., Volodin O.A., Shilkin A., Grossmann C. Investigation of flow parameters and efficiency of mixture separation on a structured packing // **AIChE J.**, 2014, Vol. 60, Issue 2, P. 690–705. Q1.
- Surtaev A.S., Pavlenko A.N. Observation of boiling heat transfer and crisis phenomena in falling water film at transient heating // **Intern. Journal of Heat and Mass Transfer**, 2014, Vol. 74, N. 7, P. 342–352. Q1.
- Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Volodin O.A. Heat transfer and critical heat flux at evaporation and boiling in refrigerant mixture films falling down the tube with structured surfaces // **Intern. Journal of Heat and Mass Transfer**, 2015, Vol. 90, P. 149–158. Q1.
- Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Volodin O.A. Heat transfer and crisis phenomena at the film flows of freon mixture over vertical structured surfaces // **Heat Transfer Engineering**, 2015. Vol. 37, P. 257–268. Q1.
- Starodubtseva I.P., Pavlenko A.N., Surtaev A.S. Heat transfer during quenching of high temperature surface by the falling cryogenic liquid film // **Intern. Journal of Thermal Sciences**, 2017. Vol. 114. No. 4. P. 196–204. Q1. Q1.
- Pavlenko A.N., Volodin O.A., Surtaev A.S. Hydrodynamics in falling liquid films on surfaces with complex geometry // **Applied Thermal Engineering**, 2017. Vol. 114. P. 1265–1274. Q1.
- Surtaev A.S., Pavlenko A.N. et al. Heat transfer and crisis phenomena at pool boiling of liquid nitrogen on the surfaces with capillary-porous coatings // **Intern. J. Heat Mass Transfer**, 2017. Vol. 108. P. 146–155. Q1.
- Pavlenko A.N., Volodin O.A., Surtaev A.S. Hydrodynamics in falling liquid films on surfaces with complex geometry // **Applied Thermal Engineering**, 2017. Vol. 114. P. 1265–1274. Q1.
- Surtaev A.S., Pavlenko A.N. et al. Heat transfer and crisis phenomena at pool boiling of liquid nitrogen on the surfaces with capillary-porous coatings // **Intern. J. Heat Mass Transfer**, 2017. Vol. 108. P. 146–155. Q1.
- Pavlenko A.N., Volodin O.A., Surtaev A.S. Hydrodynamics in falling liquid films on surfaces with complex geometry // **Applied Thermal Engineering**, 2017. Vol. 114. P. 1265–1274. Q1.
- Chernyavskii A.N., Pavlenko A.N. Numerical simulation of heat transfer and determination of critical heat fluxes at nonsteady heat generation in falling wavy liquid films // **Intern. J. Heat Mass Transfer**, 2017. Vol. 105. P. 648–654. Q1.

Список основных публикаций чл.-корр. РАН А.Н. Павленко в рецензируемых журналах

- Zhukov V.I., Pavlenko A.N. Heat transfer and critical phenomena during evaporation and boiling in a thin liquid layer at low pressures // **Intern. J. Heat Mass Transfer**, 2018. Vol. 117. P. 978–990. Q1.
- Surtaev A.S., Serdyukov V.S., Zhou J., Pavlenko A.N., Tumanov V. An experimental study of vapor bubbles dynamics at water and ethanol pool boiling at low and high heat fluxes // **Intern. J. Heat Mass Transfer**, 2018. Vol. 126. P. 297–311. Q1.
- Surtaev A.S., Kuznetsov D.V., Serdyukov V.S., Pavlenko A.N. et al. Structured capillary-porous coatings for enhancement of heat transfer at pool boiling // **Applied Thermal Engineering**, 2018. Vol. 133. P. 532–542. Q1.
- Pavlenko A.N., Pecherkin N.I., Zhukov V.I., Nazarov A.D., Meski G., Houghton P. Separation Efficiency of Mixtures by Distillation using Structured Noncircular Packings // **Chemical Engineering & Processing: Process Intensification (CEP)**, 2018. Vol. 133. P. 211–220. Q1.
- Volodin O.A., Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Zubkov N.N. Surface microstructures for boiling and evaporation enhancement in falling films of low-viscosity fluids // **Intern. J. Heat Mass Transfer**, 2020. Vol. 155. P. 119722-1–119722-10. Q1.
- Zhukov V.I., Pavlenko A.N., Shvetsov D.A. The effect of pressure on heat transfer at evaporation/boiling in a thin horizontal liquid layer on a microstructured surface produced by 3D laser printing // **Intern. J. Heat Mass Transfer**, 2020. Vol. 163, No.120488-1–120488-14. Q1.
- Pavlenko A.N., Pecherkin N.I., Zhukov V.E., Meski G.A., Houghton P.A. Overview of methods to control the liquid distribution in distillation columns with structured packing: Improving separation efficiency // **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, 2020. Vol. 132, No. 110092 -1–110092 -11. Q1.
- Starodubtseva I.P., Kuznetsov D.V., Pavlenko A.N. Experiments and modeling on cryogenic quenching enhancement by the structured capillary-porous coatings of surface // **Intern. Journal of Heat and Mass Transfer**, 2021. Vol. 176. P.121388. Q1.
- Pecherkin N.I., Volodin O.A., Pavlenko A.N., Kataev A.I., Mironova I.B. Heat transfer enhancement experiments in R21 falling film over a bundle of MAO-coated horizontal tubes // **Intern. Communications in Heat and Mass Transfer**, 2021. Vol. 129. P. 105743. Q1.
- Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Володин О.А. Теплообмен и кризисные явления в стекающих пленках жидкости при испарении и кипении. **Монография**. Новосибирск: Изд-во СО РАН «Наука», 2016, 196 с.



Лаборатория низкотемпературной теплофизики (научные сотрудники)



А.Н. Павленко
чл.-корр. РАН, зав. лаб.



Н.И. Печеркин,
Д. Т. Н., В. Н. С.



И.И. Гогонин,
проф., Г. Н. С.



В.Е. Жуков ,
К. Т. Н, С. Н. С.



А.С. Суртаев,
к. ф.- м. н., С. Н. С.



О.А. Володин,
к. ф.- м. н., С. Н. С.



Е.Ю. Слесарева,
к. ф.- м. н., Н. С.



А.Н. Чернявский,
инженер-исслед.



А.Н. Цой,
к. ф.- м. н., Н. С.



И.П. Стародубцева,
к. ф.- м. н., Н. С.



В.С. Сердюков,
к. ф.- м. н., Н. С.



Д.В. Кузнецов,
М. Н. С.