

Д.втор еор.
Л 84

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
им. М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

ЛУНЕВ Владимир Георгиевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ФРЕОНОВ
II и III В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Специальность № 05.04.03 - гидравлические машины,
машины и аппараты холодильной и криогенной техники

Диссертация написана на русском языке.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Одесса - 1974 г.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
им. М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

ЛУНЕВ Владимир Георгиевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ФРЕОНОВ
II и III В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Специальность № 05.04.03 -гидравлические машины,
машины и аппараты холодильной и криогенной техники

Диссертация написана на русском языке.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Одесский технологический
институт пищевой промышленности
им. М.В. Ломоносова
Б И Б Л И О Т Е К А

ОНАХТ 02.07.12
Исследование теплооб



v012308

Одесса - 1974 г.

Работа выполнена в Одесском технологическом институте
пищевой промышленности им.М.В.Ломоносова.

НАУЧНЫЕ РУКОВОДИТЕЛИ: доктор технических наук, профессор
ЧАЙКОВСКИЙ В.Ф.

кандидат технических наук, доцент
СМИРНОВ Г.Ф.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОПОНЕНТЫ: доктор технических наук, ст.научн.
сотрудник ВАСИЛЬЕВ Л.Л.

кандидат технических наук, ст.научн.
сотрудник ШЕКРИЛАДЗЕ И.Г.

Ведущее предприятие – институт прикладной физики АН МССР

Автореферат разослан "24" апрель 1974 г.

Защита диссертации состоит "24" май 1974 г.

на заседании Ученого Совета механического факультета Одесского
технологического института пищевой промышленности им.М.В.Ломоносова,
ул.Свердлова, 112.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОТИПИ
им.М.В.Ломоносова

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный
печатью учреждения, просим направлять в Совет института по
адресу: 270039, г.Одесса-ГСП, ул.Свердлова, 112.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
К.Т.Н.

ЗАПОРОЖЕЦ Л.А.

В последние годы предметом исследований в ряде областей
физики и техники являются гидродинамические явления в диэлектри-
ческих средах, обусловленные наличием сильных электрических
полей. Эффекты, сопровождавшие эти явления, разнообразны и нахо-
дят применение в различных областях техники (электрофильтры,
разделение компонентов жидких сред, изменение физических параме-
тров и т.д.). Особого внимания заслуживают проблемы, связанные с
воздействием электрического поля на вязкость и теплообмен.

Экспериментальные исследования теплообмена в электрическом
поле показали эффективность использования поля для управления
процессом и возможность существенной интенсификации теплообмена,
не связанной с заметными расходами электроэнергии.

Исследования теплообмена в электрическом поле имеют большое
значение для организации тепловых режимов устройств, являющихся
по технологическим причинам источниками электрического поля
(радиотехническая и электротехническая аппаратура). В качестве
теплоносителей испарительных систем охлаждения таких устройств
могут использоваться жидкости – диэлектрики (в частности фреоны).
Исследование эффектов воздействия поля на процессы теплообмена
при фазовых превращениях диэлектрических жидкостей позволят опре-
делить возможность рационального использования электрического
поля такой аппаратуры для обеспечения надежного теплового режима
работы.

Использование гидродинамических эффектов воздействия электри-
ческого поля на жидкость-диэлектрик в некоторых специальных
устройствах совместно с интенсифицирующим воздействием поля на
теплообмен определяют перспективность исследований в этом
направлении.

Экспериментальные данные о влиянии электрического поля на
процесс конденсации диэлектрических жидкостей ограничены исполь-

зованием в качестве рабочего вещества неполярной жидкости и практически одного типа поля-электростатического. Существуют расхождения в представлениях о механизме интенсифицирующего воздействия поля на теплоотдачу при конденсации. Расчетные рекомендации ограничены и не отражают выявленных экспериментально закономерностей процесса конденсации в поле.

Предлагаемая диссертационная работа, посвященная исследованию теплообмена при конденсации фреонов II и II3 в электрическом поле, состоит из введения, пяти глав и выводов.

В первой главе приведен анализ теоретических и экспериментальных исследований процесса конденсации в электрическом поле и сформулированы задачи исследования.

В работе [3] экспериментально показана возможность интенсификации процесса конденсации фреона-II3 на вертикальной пластине при наложении электростатического поля примерно в 2,5 раза. Авторы считают, что интенсифицирующее действие электростатического поля связано с утонением конденсатной пленки за счет срыва полем части конденсата с поверхности теплообмена. Расчетные зависимости теплоотдачи в электрическом поле отсутствуют.

При экспериментальном исследовании теплоотдачи при конденсации фреона-II3 внутри вертикальной трубы [12] наблюдалось увеличение интенсивности теплообмена примерно в 2 раза. Интенсификация теплоотдачи объясняется неустойчивостью границы раздела фаз в поле, предполагается в отличие от [3], что роль неоднородности поля существенна. Опубликованные опытные данные получены при использовании одного электрода. Критерийное уравнение корреляции теплоотдачи в электрическом поле в [12] обобщает только опытные данные автора.

В [3,12] интенсификация теплоотдачи в поле зафиксирована при напряженности поля $E \geq (2 + 2,5) \frac{KV}{MM}$.

В [2,5] максимальная интенсификация теплоотдачи при конденсации фреона-II снаружи горизонтальной трубы в электростатическом поле составила примерно 40%. Авторы показали, что основной эффект интенсификации теплоотдачи при конденсации в поле связан не с воздействием объемных сил в пленке, определяемых неоднородностью поля, а с действием поверхностных сил поля на границе раздела фаз. Предложена расчетная формула теплоотдачи при конденсации на горизонтальной трубе в электростатическом поле.

В [1,11] проанализированы условия развития неустойчивости поверхности жидкости в электростатическом поле. Предложены расчетные зависимости, позволяющие оценить влияние параметров возмущения, свойств среды, напряженности поля на устойчивость поверхности жидкости.

Исследование [4] процесса конденсации фреона-II3 на вертикальной пластине в электростатическом поле показало, что при оптимальных конструктивных параметрах конденсатора и максимальных напряженностях поля возможна значительная интенсификация теплообмена (~ 10 раз). Установлено существенное влияние межэлектродного зазора и перфорации электрода на эффект интенсификации теплообмена. В [4] определены оптимальные конфигурация электрода и расстояние его от пластины - конденсатора, обеспечивающие максимальные эффекты. Анализ механизма процесса не обсуждается.

В [10] исследовано влияние неоднородного переменного электрического поля с частотой 60 гц на конденсацию фреона-II4 на поверхности горизонтальной и слегка наклонной пластины. Получено максимальное увеличение интенсивности теплообмена в $\sim (30-40)$ раз. В условиях горизонтальной пластины с конденсацией сверху,

когда составляющая гравитационных сил, касательная к поверхности теплообмена мала, приложение даже небольших по величине массовых сил неоднородного электрического поля существенно ускоряет движение жидкости в пленке, уменьшает ее толщину и увеличивает теплоотдачу, что объясняет полученные результаты. Используя анализ Нуссельта для пленочной конденсации и учитывая при этом массовые силы неоднородного электрического поля в жидкости, авторы предложили расчетную зависимость теплоотдачи в поле. Однако в некоторых опытах при высоких напряжениях на электроде экспериментальные значения α значительно превышают расчетные (более, чем в 4 раза))

На основании анализа выполненных работ по исследованию влияния электрического поля на процесс конденсации сформулированы основные задачи исследования:

1. Разработать физическую модель теплопереноса при конденсации диэлектрика в электрическом поле.
2. Определить условия срыва жидкой пленки с поверхности.
3. Исследовать теплоотдачу при конденсации в переменном и пульсирующем электрическом поле.
4. Выполнить фотографирование процесса конденсации в электрическом поле.
5. Провести экспериментальное исследование влияния размеров и конфигурации электродов на процесс конденсации диэлектрика в электрическом поле.
6. Исследовать влияние электрического поля на взаимосвязанные процессы конденсации и испарения, происходящие в ограниченном пространстве.
7. Сопоставить влияние на процесс конденсации постоянного и переменного электрических полей.

8. Получить расчетные зависимости для теплообмена при конденсации чистых паров диэлектрических жидкостей в электрических полях.

Во второй главе представлена физическая модель процесса воздействия электрического поля на конденсацию диэлектриков и на основании модели выполнен приближенный теоретический анализ механизма теплообмена при конденсации диэлектриков на вертикальной поверхности в электростатическом поле напряженностью $E > E_{кр}$.

Из физики известно, что механическая сила электрического поля, действующая на элемент пленки жидкого диэлектрика толщиной δ и площадью I , может быть представлена как сумма сил:

$$f = f_k + f_r + f_n \quad (1)$$

где кулоновская сила, связанная с наличием объемной плотности свободных зарядов,

$$f_k = \chi E \quad (2)$$

массовая сила, связанная с наличием $\text{grad } E^2$,

$$f_r = \int \frac{\epsilon_0(\epsilon_{mc} - 1)}{2} \nabla E^2 dV \quad (3)$$

Для плоской границы раздела фаз плотность поверхностных электрогидродинамических сил по [12]

$$f_n = \left(\frac{\epsilon_{mc} - \epsilon_n}{\epsilon_{mc}} \right)^2 \epsilon_0 E^2 \quad (4)$$

Для диэлектриков такого типа как фреоны $f_k + f_r \ll f_n$. Это обстоятельство было отмечено в [2,5]. Однако, сила f_n нормальна к границе раздела фаз, т.е. к движению пленки, и до

тех пор пока $f_n \leq f_0$. Действие этой силы приводит только к деформации внешней поверхности пленки. Напряженность электрического поля, при которой $f_n = f_0$ называется "критической" $E_{кр}$. При $E = E_{кр}$ наступает разрушение конденсатной пленки и коренное изменение механизма движения и теплообмена при конденсации.

Фотографирование, визуальные наблюдения и сведения приведенные в [2 + 5, 10, 12] позволили установить, что при $E > E_{кр}$ в межэлектродном пространстве возникают потоки конденсата с поверхности теплообмена на электрод и обратно в форме струй и частично капель.

С ростом напряженности этот процесс интенсивно развивается, плотность таких струй возрастает, а их поперечные размеры уменьшаются.

Эти наблюдения позволили сформировать "струйную" модель механизма теплообмена при конденсации диэлектрика в электрическом поле напряженностью $E > E_{кр}$.

При этом не ставилась задача получения точной аналитической зависимости для расчета теплоотдачи при конденсации диэлектриков в электрическом поле. Цель теоретического анализа состояла в получении приближенных соотношений и разработки на этой основе обоснованной формы обобщения опытных данных.

Основное содержание предложенной физической модели сводится к следующему:

1. Существует критическое значение напряженности поля, при котором начинается разрушение конденсатной пленки.

2. При значениях напряженности $E < E_{кр}$ изменение толщины пленки связано в основном с действием ponderomotorных сил электрического поля, пропорциональных $\text{grad } E^2$ в направлении движения конденсата.

3. При $E > E_{кр}$ с конденсатной пленки срывается часть жидкости. При этом, вследствие некоторого переохлаждения срывающейся жидкости, происходит конденсация на ее поверхности в паровом пространстве.

4. Перенос конденсата осуществляется как с поверхности теплообмена на электрод, так и обратно. Развивающийся при $E > E_{кр}$ процесс массопереноса в межэлектродном зазоре определяет уровень термического сопротивления теплообмена на стенке конденсатора.

5. Существует устойчивый баланс массовых расходов конденсата с поверхности теплообмена на электрод и обратно.

6. Формирование струй происходит на вершинах наименее устойчивых электрогидродинамических волн.

7. Геометрия струй определяется из условий равенства сил поверхностного натяжения и электрического поля $f_0 \geq f_n$.

8. Средняя по сечению струи температура срывающегося конденсата равна средней температуре стекающей по поверхности теплообмена пленки и определяется из условий теплообмена между "ядром" пленки жидкости и стенкой с одной стороны и между поверхностью пленки и ее ядром с другой стороны, с учетом количества тепла воспринятого жидкостью в паровом пространстве в процессе конденсации на струях.

9. Гидродинамическое воздействие струй перебрасываемых с поверхности электрода приводит к формированию на поверхности теплообмена в пределах одной элементарной ячейки двух зон. Площадь элементарной ячейки есть площадь поверхности теплообмена приходящаяся на I струю.

Часть элементарной ячейки "занята" зоной взаимодействия струи со стенкой. Гидродинамика и теплообмен в этой области определяются по рекомендациям [7] Остальную часть элемен-

тарной ячейки составляет условная зона гравитационного стекания конденсата. Теплообмен в этой зоне рассчитывается с учетом режима течения и, принимая во внимание, относительное увеличение удельных расходов жидкости, по известным рекомендациям.

Ю. Не учитывается возможность влияния струй, изменение их геометрии под действием гравитации, диспергирование.

И. Соотношение площадей зоны гидродинамического воздействия струи и условной зоны гравитационного стекания конденсата определяется из равенства динамических напоров потоков жидкости на границе зон.

На первом этапе теоретического анализа определена расчетная зависимость критической напряженности электростатического поля для падающей пленки жидкого диэлектрика.

Были приняты, в первом приближении, параметры волнового течения падающей пленки без учета воздействия поля по [7]. Полагая, что $E = E_{кр}$ при $|f_n| \approx |f_0|$ на гребне волны получена расчетная зависимость для критической напряженности поля

$$E_{кр} = K_1^* \sqrt{\frac{2 \psi \delta \sigma \epsilon_{жс}}{\epsilon_0 (\epsilon_{жс} - 1)}} \quad (5)$$

При построении на основании принятой модели расчетных формул использованы данные анализа устойчивости поверхности жидкости в электрическом поле, приведенные в [12].

Длина волн, имеющих наивысший темп развития неустойчивости,

$$\lambda^* = \frac{8 \pi \sigma \epsilon_{жс}^2}{3 (\epsilon_{жс} - \epsilon_{см})^2 \epsilon_0 E^2} \quad (6)$$

С учетом того, что струи воздействующие на поверхность теплообмена формируются на электроде

$$R_c = \frac{\sigma \epsilon_{жс}^2}{(\epsilon_{жс} - \epsilon_{см})^2 \epsilon_0 E^2} \left(\frac{z_3}{z_k} \right)^2 \quad (7)$$

При образовании струй часть потенциальной энергии поверхностных электрогидродинамических сил превращается в работу по преодолению сил поверхностного натяжения, что приводит к разрушению пленки, остальная часть превращается в кинетическую энергию струи. Из этих соображений средняя скорость жидкости в струе

$$W_E = \frac{\epsilon_{жс} - \epsilon_{см}}{\epsilon_{жс}} E \frac{z_k}{z_3} \sqrt{\frac{2 \epsilon_0}{\rho} \left[1 - \left(\frac{E_{кр} z_3}{E z_k} \right)^2 \right]} \quad (8)$$

Объемный расход жидкости в струе

$$G_c = \frac{\pi \sigma^2 \epsilon_{жс}^3}{(\epsilon_{жс} - \epsilon_{см})^3 \epsilon_0^2 E^3} \left(\frac{z_3}{z_k} \right)^3 \sqrt{\frac{2 \epsilon_0}{\rho} \left[1 - \left(\frac{E_{кр} z_3}{E z_k} \right)^2 \right]} \quad (9)$$

Коэффициент теплоотдачи α_c при конденсации в электрическом поле на струях в первом объеме рассчитывался по рекомендациям [6]

$$\alpha_c = c_1 c_p \frac{\epsilon_{жс} - \epsilon_{см}}{\epsilon_{жс}} E \frac{z_k}{z_3} \sqrt{\epsilon_0 \rho \left[1 - \left(\frac{E_{кр} z_3}{E z_k} \right)^2 \right]} \times \quad (10)$$

$$\times \left[\frac{\sigma}{h \left(\frac{\epsilon_{жс} - \epsilon_{см}}{\epsilon_{жс}} \right)^2 \epsilon_0 E^2 \left(\frac{z_3}{z_k} \right)^2 + c_2 \sigma} \right]^{0,54}$$

С учетом основных положений физической модели и соотношений (4), (6), (7), (9), (10) средний по элементарной ячейке коэффициент теплоотдачи, отнесенный к поверхности теплообмена, $\bar{\alpha}_E$ определяется:

$$\bar{\alpha}_E = \frac{a}{\lambda^*} \bar{\alpha}_N + C_3 \frac{z}{z+1} \frac{\lambda(\epsilon_{жс} - \epsilon_{см})E}{\sqrt{\epsilon_{жс}}} \left(\frac{z_3}{z_k}\right)^3 \times \\ \times \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\rho} \left[1 - \left(\frac{E_{кр} z_3}{E z_k}\right)^2\right]} \ln \left[C_4 \left(\frac{z_k}{z_3}\right)^2 \sqrt{1 - \frac{a}{\lambda^*}} \right] \quad (11)$$

Коэффициент \bar{z} учитывает влияние прогрева струи в паровом объеме на среднюю температуру жидкости на стенке.

$$\bar{z} = 1 - \frac{\pi R_c^2}{2\lambda^{*2} \left(1 - \frac{a}{\lambda^*}\right)} + \quad (12)$$

$$+ \frac{C_4 R_c \ell_c \bar{\alpha}_c V}{\lambda^{*2} \left(1 - \frac{a}{\lambda^*}\right) \lambda G_c \left[1 + \frac{\ell_c \bar{\alpha}_c}{R_c \rho C_p W_E}\right] \ln \left[C_3 \left(\frac{z_k}{z_3}\right)^2 \sqrt{1 - \frac{a}{\lambda^*}} \right]}$$

Расчеты показали, что значения комплекса $\frac{\bar{z}}{\bar{z}+1}$ находятся в пределах 0,5-0,8.

С учетом принятой физической модели по [8] доля зоны взаимодействия струи с стенкой в общей площади элементарной ячейки $\frac{a}{\lambda^*}$ определяется

$$\frac{a}{\lambda^*} \approx 1 - C_3 \left(\frac{z_3}{z_k}\right)^2 \sqrt[3]{\frac{\sigma}{\rho g^{1/3}} \sqrt[1/2]{\left(\frac{z_p}{gH}\right)^{5/2} \left[1 - \left(\frac{E_{кр} z_3}{E z_k}\right)^2\right]}} \quad (13)$$

Анализируя соотношение (13) можно отметить, что с ростом тепловой нагрузки конденсатора - доля поверхности занятой гравитационным стеканием жидкости увеличивается. Увеличение напряженности поля уменьшает эту зону. Существенное влияние на соотношение рассматриваемых зон течения конденсата оказывает характер электрического поля в объеме конденсатора. С увеличением неоднородности поля, характеризующейся параметром $\frac{z_3}{z_k}$, существенно уменьшается зона динамического воздействия струи на поверхность теплообмена.

В условиях пониженной и, в пределе нулевой, гравитации отвод конденсата с поверхности теплообмена в основном будет определяться соотношением величин динамического воздействия струй по периметру поверхности и механических сил, обусловленных неоднородностью поля на краях поверхности, препятствующих отводу конденсата. При уменьшении гравитационных сил и фиксированной паропроизводительности температурный напор конденсатора будет возрастать до тех пор, пока не установится баланс массопритока вследствие конденсации и отвода жидкости с поверхности. При этом будет иметь место частичное заполнение парового объема конденсатора жидкостью, приводящее к ухудшению теплоотдачи. Количественный анализ для указанных условий требует постановки специальных аналитических исследований и модельных экспериментов.

Полученная таким образом приближенная, зависимость для расчета теплоотдачи при конденсации диэлектриков на вертикальной поверхности в электрическом поле имеет вид:

$$\bar{\alpha}_E = \left\{ 1 - C_3 \left(\frac{z_3}{z_k}\right)^2 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g^{1/3}} \sqrt[1/2]{\left(\frac{z_p}{gH}\right)^{5/2} \left[1 - \left(\frac{E_{кр} z_3}{E z_k}\right)^2\right]}} \right\} \bar{\alpha}_N + \\ + C_3 \frac{z}{z+1} \frac{\lambda(\epsilon_{жс} - \epsilon_{см})E}{\sqrt{\epsilon_{жс}}} \left(\frac{z_3}{z_k}\right)^3 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\rho} \left[1 - \left(\frac{E_{кр} z_3}{E z_k}\right)^2\right]} \times \\ \times \ln \left[C_6 \frac{z_k}{z_3} \sqrt[3]{\frac{\sigma}{\rho g^{1/3}} \sqrt[1/2]{\left(\frac{z_p}{gH}\right)^{5/2} \left[1 - \left(\frac{E_{кр} z_3}{E z_k}\right)^2\right]}} \right]$$

Приведение (I4) к безразмерному виду позволило получить зависимость в критериальной форме:

$$Nu_E \approx \left\{ 1 - C_3 K_2^2 K^{0,33} Re_H^{-0,14} \left[1 - \left(\frac{K_2}{K_E} \right)^2 \right]^{0,33} \right\} Nu_0 + \quad (I5)$$

$$+ C_4 Re_E K_2^3 \ln \left\{ C_0 K_2^{-1} K^{0,12} Re_H^{-0,07} \left[1 - \left(\frac{K_2}{K_E} \right)^2 \right]^{0,12} \right\}$$

В качестве определяющего размера в критериях Нуссельта и Рейнольдса принята высота теплообменной поверхности.

Критерий K_E характеризует отношение потенциальной энергии границы раздела фаз, обусловленной существованием поверхностных электрических сил, к энергии, которая необходима для разрушения жидкой пленки в электрическом поле.

Критерий Re_E характеризует отношение сил электрического поля обеспечивающих массоперенос в паровом пространстве к силам вязкости.

Геометрический симплекс K_2 отражает степень неоднородности электрического поля в конденсаторе.

Таким образом при конденсации диэлектриков на вертикальной поверхности в электрическом поле

$$Nu_E = f(Nu_0, Re_H, Re_E, K, K_E, K_2) \quad (I6)$$

В работе для обобщения экспериментальных данных использовалась зависимость (I5).

Экспериментальные исследования выполнены на двух стендах, позволивших определить влияние электрического поля на процесс конденсации: на горизонтальной и вертикальной трубе, при конденсации на внутренней и внешней поверхности, с одним электродом и комбинационным их включении, при различной конфигурации электродов, с адиабатными и обогреваемыми электродами, при различных характеристиках поля (постоянное, переменное, пульсирующее), с использованием различных теплоносителей.

В третьей и четвертой главах представлены описания экспериментальных установок и методика проведения опытов.

Интенсифицирующее воздействие переменного с частотой 50 гц и пульсирующего с частотами в диапазоне до 18 гц электрических полей на процесс конденсации фреона-II снаружи горизонтальной трубы исследовано на экспериментальной установке № I (Рис. I и Рис. 2). Рабочая длина экспериментальной трубы составила 1,2 м, диаметр - 14 мм [2]. Параллельно выполнялись работы по визуализации процесса воздействия поля на теплообмен, проводились фотографирование и киносъемка. Использование пульсирующего поля имело целью проверить возможность интенсификации процесса за счет периодического удаления скапливавшегося, как показали предварительные визуальные наблюдения, в межэлектродном зазоре конденсата. Пульсация электрического поля в конденсаторе обеспечивалась высоковольтным коммутирующим устройством, привод которого осуществлялся от электродвигателя постоянного тока.

В опытах в широком диапазоне изменялась конфигурация электрического поля вокруг поверхности теплообмена (таблица I).

Таблица I

Электроды под напряжением	Напряжение на электродах
четыре	постоянное
	переменное
	пульсирующее
	два верхних - постоянное
	два нижних - переменное
	два верхних - переменное
два нижних	постоянное
	переменное

Основные задачи исследования представлены в опытах с конденсацией диэлектрика внутри вертикальной трубы при наложении электрического поля. Схема экспериментальной установки № 2 и экспериментального участка представлены на Рис. 4 и Рис. 3. Внутренний диаметр конденсатора - 30 мм, рабочая высота - 215 мм.

В предварительной серии опытов было предусмотрено получение данных о теплоотдаче при конденсации без наложения электрического поля.

В опытах с наложением электрического поля в соответствии с задачами и программой исследования изучалось влияние постоянного и переменного с частотой 50 гц электрических полей в диапазоне изменения тепловых нагрузок конденсатора ($1 \cdot 10^4 \rightarrow 2 \cdot 10^4$ Вт). Для определения влияния конфигурации поля на эффект интенсификации использовались различные типы электродов (таблица 2).

Использование гладких, с винтовой нарезкой и с покрытым сеткой электродов предназначалось для получения экспериментальных данных о влиянии "концентраторов" напряженности поля по высоте теплообменника на процесс конденсации в электрическом поле.

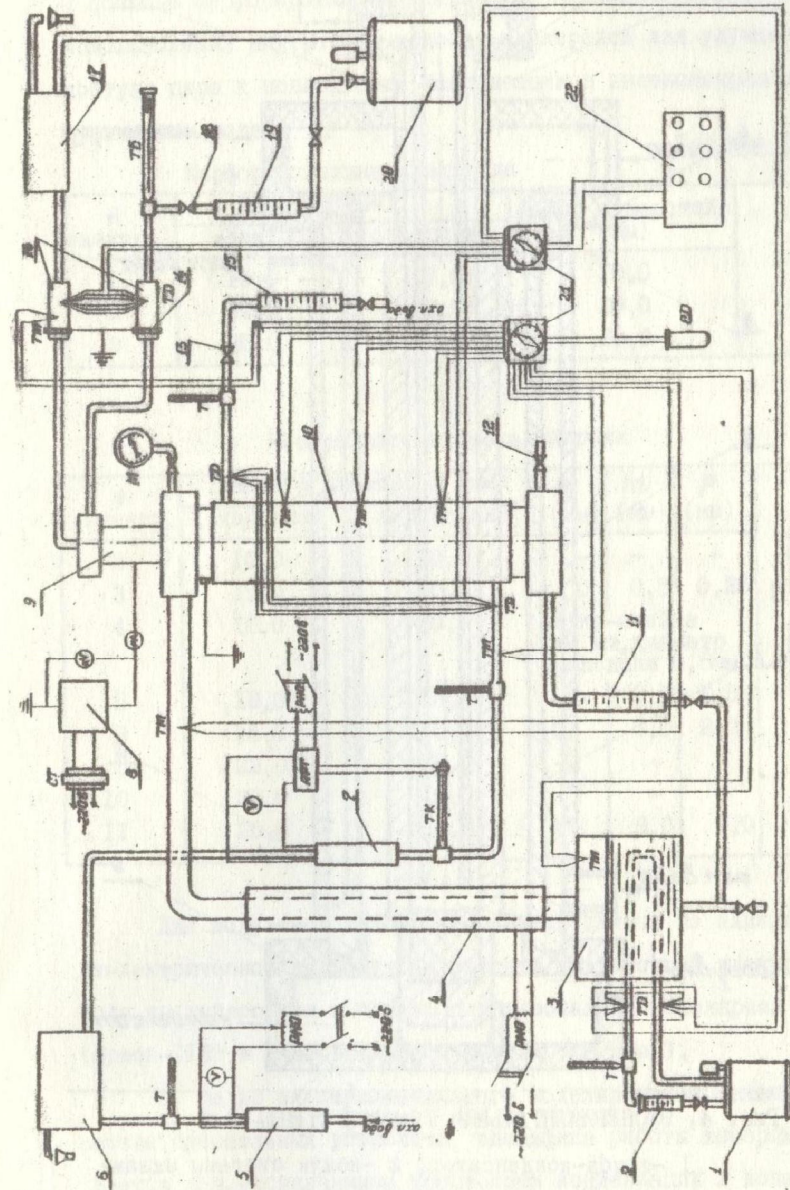


Рис. 3. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТАНОВКИ № 2.

1-термометр сопротивления; 2, 11, 15, 19 -осевые электроды; 3-аспиратор; 4-сушилка; 5, 7-теплообменник; 6, 17-напорный бак; 8-источник высокого напряжения; 9-алектрод; 10-конденсатор; 12-вентиль запорная в продуктах; 13, 18 -вентиль запорная в продуктах; 14-акрацирующая сетка; 15-осевый термометр; 16-осевый термометр; 17-термометр; 18-термометр; 19-термометр; 20-термометр; 21-термометр; 22-вентиль запорная в продуктах; 23-вентиль запорная в продуктах; 24-вентиль запорная в продуктах; 25-вентиль запорная в продуктах; 26-вентиль запорная в продуктах; 27-вентиль запорная в продуктах; 28-вентиль запорная в продуктах; 29-вентиль запорная в продуктах; 30-вентиль запорная в продуктах; 31-вентиль запорная в продуктах; 32-вентиль запорная в продуктах; 33-вентиль запорная в продуктах; 34-вентиль запорная в продуктах; 35-вентиль запорная в продуктах; 36-вентиль запорная в продуктах; 37-вентиль запорная в продуктах; 38-вентиль запорная в продуктах; 39-вентиль запорная в продуктах; 40-вентиль запорная в продуктах; 41-вентиль запорная в продуктах; 42-вентиль запорная в продуктах; 43-вентиль запорная в продуктах; 44-вентиль запорная в продуктах; 45-вентиль запорная в продуктах; 46-вентиль запорная в продуктах; 47-вентиль запорная в продуктах; 48-вентиль запорная в продуктах; 49-вентиль запорная в продуктах; 50-вентиль запорная в продуктах; 51-вентиль запорная в продуктах; 52-вентиль запорная в продуктах; 53-вентиль запорная в продуктах; 54-вентиль запорная в продуктах; 55-вентиль запорная в продуктах; 56-вентиль запорная в продуктах; 57-вентиль запорная в продуктах; 58-вентиль запорная в продуктах; 59-вентиль запорная в продуктах; 60-вентиль запорная в продуктах; 61-вентиль запорная в продуктах; 62-вентиль запорная в продуктах; 63-вентиль запорная в продуктах; 64-вентиль запорная в продуктах; 65-вентиль запорная в продуктах; 66-вентиль запорная в продуктах; 67-вентиль запорная в продуктах; 68-вентиль запорная в продуктах; 69-вентиль запорная в продуктах; 70-вентиль запорная в продуктах; 71-вентиль запорная в продуктах; 72-вентиль запорная в продуктах; 73-вентиль запорная в продуктах; 74-вентиль запорная в продуктах; 75-вентиль запорная в продуктах; 76-вентиль запорная в продуктах; 77-вентиль запорная в продуктах; 78-вентиль запорная в продуктах; 79-вентиль запорная в продуктах; 80-вентиль запорная в продуктах; 81-вентиль запорная в продуктах; 82-вентиль запорная в продуктах; 83-вентиль запорная в продуктах; 84-вентиль запорная в продуктах; 85-вентиль запорная в продуктах; 86-вентиль запорная в продуктах; 87-вентиль запорная в продуктах; 88-вентиль запорная в продуктах; 89-вентиль запорная в продуктах; 90-вентиль запорная в продуктах; 91-вентиль запорная в продуктах; 92-вентиль запорная в продуктах; 93-вентиль запорная в продуктах; 94-вентиль запорная в продуктах; 95-вентиль запорная в продуктах; 96-вентиль запорная в продуктах; 97-вентиль запорная в продуктах; 98-вентиль запорная в продуктах; 99-вентиль запорная в продуктах; 100-вентиль запорная в продуктах.

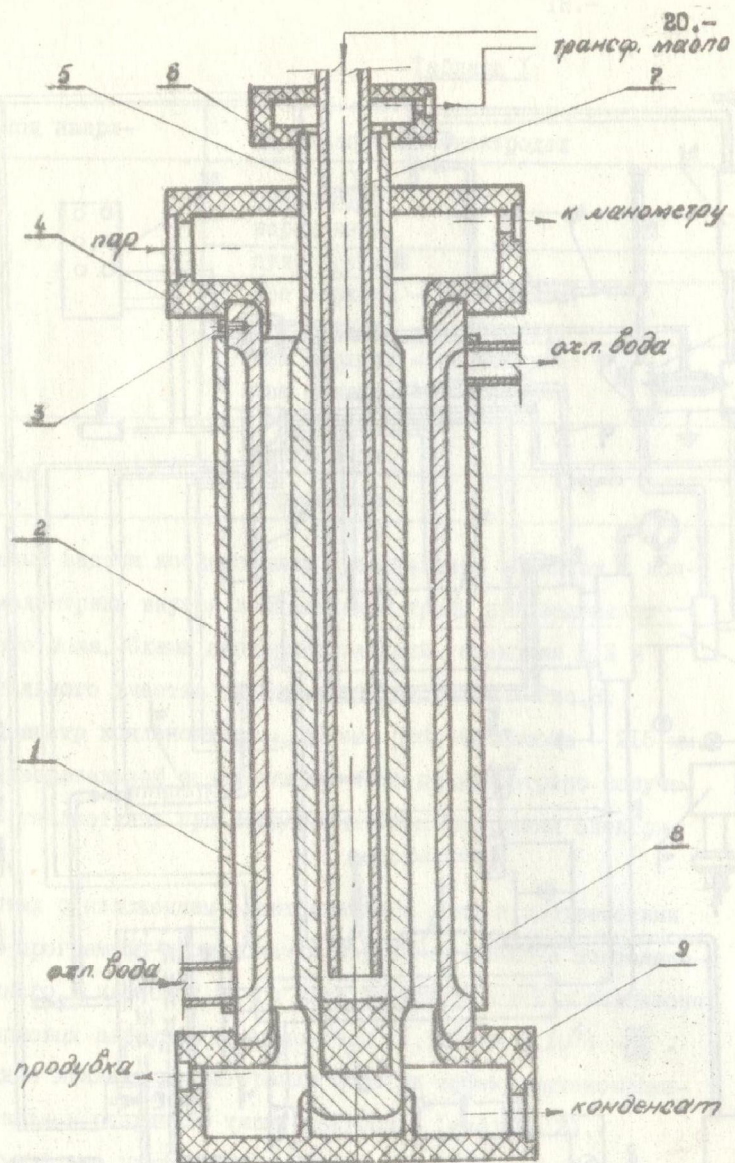


Рис. 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ УЧАСТОК СТЕНДА № 2

1 - труба-конденсатор; 2 - кожух системы охлаждения; 3 - винт заземления; 4 - крышка верхняя; 5 - электрод; 6 - крышка электрода; 7 - трубка стеклянная; 8 - вставка; 9 - крышка нижняя.

С помощью перфорированных электродов проверялась эффективность использования внутренней полости электродов для улучшения условий доступа пара к поверхности конденсации в высоконапряженном электрическом поле.

Таблица 2

Перфорированные электроды

№ электр.	Диаметр (мм)		Шаг отверстий (мм)	
	электрод	отверстие		
I	15,0	7,0	10,0	
7	22,0	9,0	20,0	
9	25,0	9,0	20,0	

Неперфорированные электроды

№ электр.	Диаметр электрода (мм)		h (мм)	m (мм)	p (мм)	
	наружный	внутренний				
2	15,0	10,0	-	-	-	
3	15,0	10,0	0	0,5	0,25	
4	18,0	10,0	сетка-ячейка 2x2 мм, диаметр проволоки 0,5 мм			
5	18,0	10,0	1,0	5,0	1,5	
6	18,0	10,0	0	3,0	2,0	
8	22,0	10,0	-	-	-	
10	25,0	10,0	-	-	-	
11	25,0	10,0	0	3,0	2,0	

Для получения экспериментальных данных по влиянию свойств диэлектрической жидкости на эффекты воздействия электрического поля на теплообмен в опытах использовались неполярная жидкость (фреон-113) и слабополярная (Диэтиловый эфир).

С целью экспериментального моделирования режимных характеристик специальных устройств, специфика работы которых определяется взаимосвязанными процессами конденсации и испарения в ограниченном пространстве, предложена методика экспериментов с

обогреваемыми электродами (Рис.4). Обогрев электрода и испарение с его поверхности конденсата, переносимого силами электрического поля, осуществлялись за счет циркуляции внутри электрода трансформаторного масла с температурой превышающей температуру насыщения пара в конденсаторе. Расход масла определялся объемным расходом, охлаждение — по показанию шестиспайной дифференциальной термомпары, с дублированием замера по термометру Бекмана. Так как в основных опытах непосредственное измерение температуры стенки высоковольтного электрода не представлялось возможным, то дополнительно были выполнены тарировочные опыты по определению коэффициентов теплоотдачи на обогреваемом электроде при отсутствии напряжения на нем. При этом тепловые потоки на электроде, соответствующие основным опытам, имитировались циркулирующей вокруг электрода охлаждающей водой, работа масляной системы электрода оставалась такой же, как и в основных опытах с полем. Полученные тарировочные зависимости позволили с точностью $\pm 50\%$ оценить коэффициенты теплоотдачи на электроде при наложении электрического поля на процесс конденсации.

Для создания высокого напряжения на электродах использовался аппарат АИИ-70. Напряжение определялось по показанию электростатического киловольтметра С-100, ток в цепи электрод — поверхность конденсации регистрировался микроамперметром.

Замеры в опытах производились при установившемся режиме работы установок. Режим считался установившемся, если в течение 15 мин не наблюдалось изменения основных параметров (давления и температуры пара, охлаждения трансформаторного масла).

В пятой главе приведены результаты экспериментального исследования, выполнен анализ их и сопоставление с расчетными зависимостями и данными других авторов.

О влиянии на процесс конденсации фреона-II снаружи горизонтальной трубы переменного с частотой 50 гц и пульсирующего с частотами в диапазоне до 18 гц электрических полей можно судить по Рис.5. Там же приведены результаты исследований [2] влияния электростатического поля. Можно сделать вывод, что переменное поле с частотой 50 гц оказывает на процесс конденсации такое же влияние, как и электростатическое: максимальное увеличение интенсивности теплообмена составляет около 20%. Пульсирующее поле приводит к меньшим эффектам, повидимому, инерционность пленки препятствует интенсификации процесса переноса конденсата.

Результаты опытов по теплоотдаче при конденсации фреона-III и диэтилового эфира внутри вертикальной трубы без электрического поля показали, что коэффициенты теплоотдачи приблизительно на 10% ниже значений, соответствующих теории Нуссельта.

Исследования теплообмена при конденсации фреона-III внутри вертикальной трубы в электростатическом поле позволили установить возможность существенной интенсификации теплообмена при использовании перфорированных электродов (\sim в 3,6 раза) (Рис.6).

Представленные на Рис.6 расчетные зависимости теплоотдачи при наложении электрического поля и расчетное значение критической напряженности поля удовлетворительно согласуются с опытными данными. Отсутствие расслоения экспериментальных данных для электродов разных диаметров объясняются различными параметрами перфорации. Определение оптимальной перфорации в задачи исследования не входило.

Сопоставление с помощью Рис.6 эффектов интенсификации процесса при использовании перфорированных и непроницаемых адиабатных электродов показывает, что уменьшение межэлектродного расстояния для последних приводит к значительному снижению интенсифицирующего воздействия поля. Это свидетельствует, повидимому, о том,

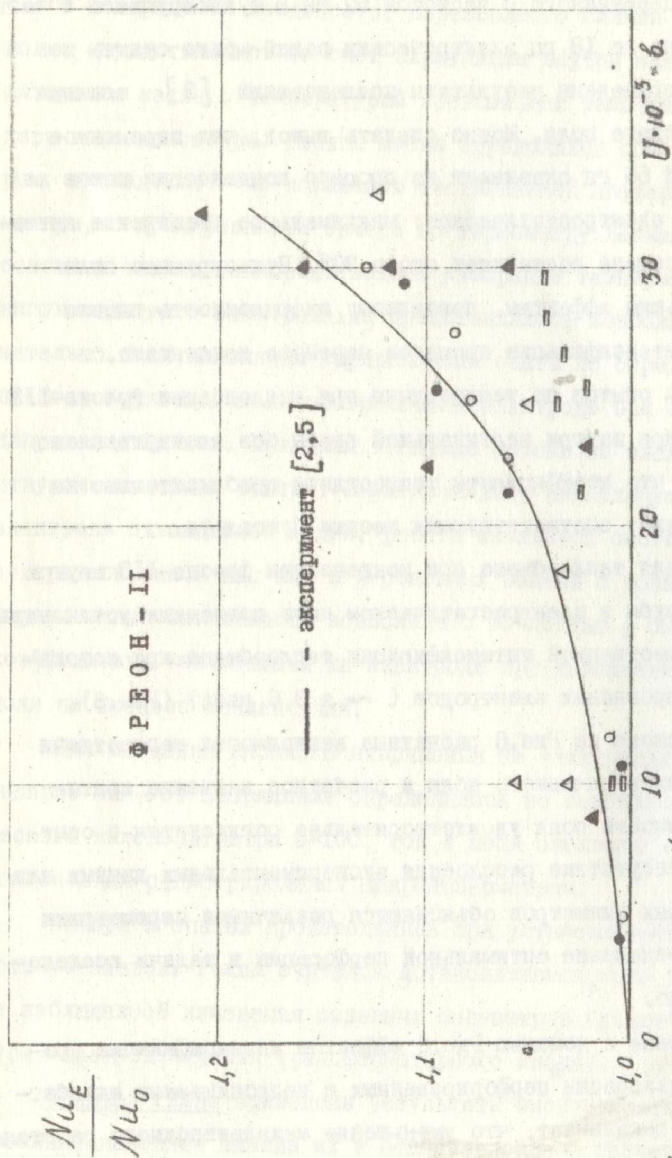


Рис. 5. ЗАВИСИМОСТЬ $\frac{Nu_E}{Nu_0} = f(U)$ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ФРЕОНА-II СНАРУЖИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ. Напряжение на электродах: \circ, Δ - постоянное; \bullet, \blacktriangle - переменное; \square, \blacklozenge - пульсирующее. \circ, \bullet - включены два нижних электрода; Δ, \blacktriangle - включены четыре электрода.

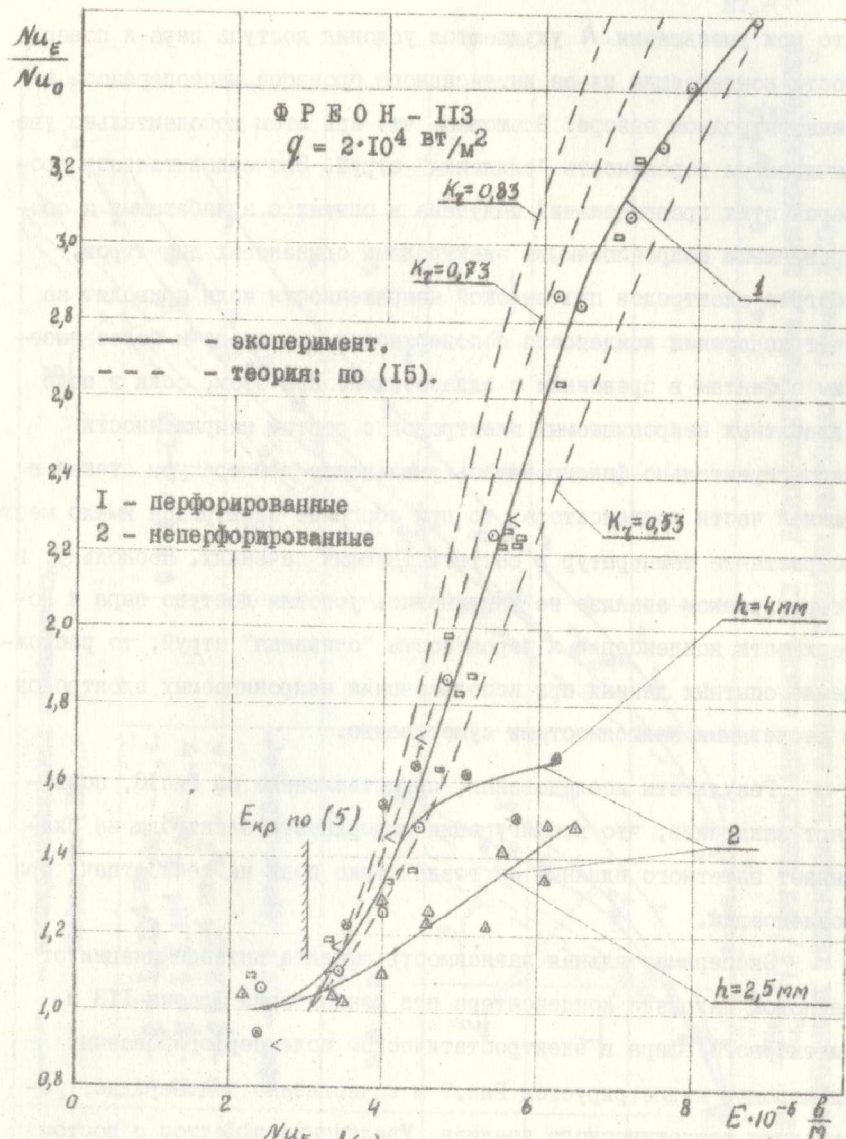


Рис. 6. ЗАВИСИМОСТЬ $\frac{Nu_E}{Nu_0} = f(E)$ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ФРЕОНА-II3 В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ АДИАБАТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОДОВ. (Стенд № 2) электроды: \langle - № 6, \circ - № 7, \bullet - № 8, \square - № 9, Δ - № 10 и № 11. электроды № 7, № 9 - перфорированные.

что при уменьшении h ухудшаются условия доступа пара к поверхности конденсации из-за интенсивного процесса массопереноса в межэлектродном зазоре. Возможно, что при этом дополнительно увеличивается вероятность "слипания" струй. Экспериментальная проверка этих предположений получена в опытах с адиабатными и обогреваемыми непроницаемыми электродами одинаковых диаметров. Обогрев электродов при высокой напряженности поля приводит за счет испарения конденсата с поверхности электрода к более высоким эффектам в сравнении с адиабатными. При этом, если в поле адиабатных непроницаемых электродов с ростом напряженности экспериментально фиксировалось уменьшение температуры стенки в нижней части конденсатора, то при обогреве электродов имело место возрастание температур в соответствующих сечениях. Поскольку, в теоретическом анализе не учитывались условия доступа пара к поверхности конденсации и вероятность "слипания" струй, то расхождение опытных данных при использовании непроницаемых электродов с расчетными зависимостями существенно.

Результаты исследования, представленные на Рис.6, позволяют заключить, что конфигурация поверхности электрода не оказывает заметного влияния на воздействие поля на теплоотдачу при конденсации.

Экспериментальная зависимость эффекта интенсификации от тепловой нагрузки конденсатора при конденсации фреона-113 и диэтилового эфира в электростатическом поле перфорированных электродов иллюстрируется Рис.7 и качественно подтверждает результаты теоретического анализа. Увеличение эффектов с ростом тепловой нагрузки объясняется в основном характером зависимости коэффициентов теплоотдачи от тепловой нагрузки при отсутствии поля.

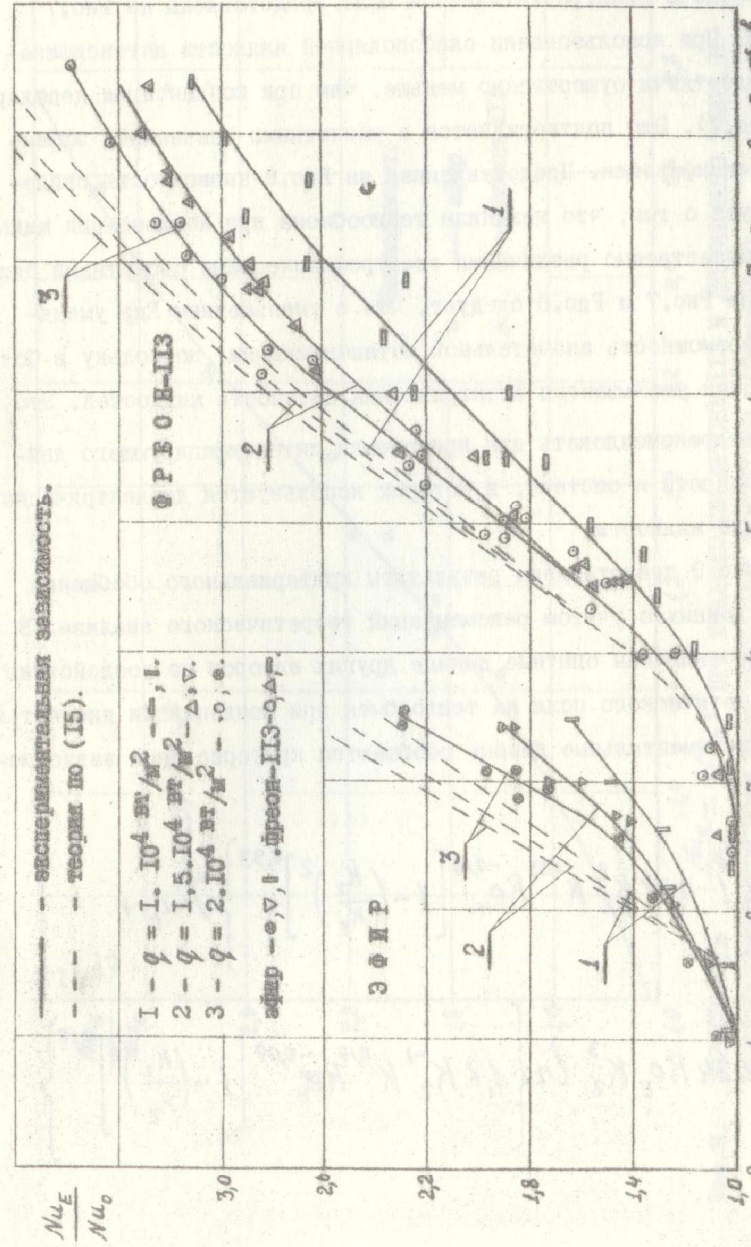


Рис.7. ЗАВИСИМОСТЬ $\frac{Nu_E}{Nu_0} = f(E)$ ПРИ КОНФИГУРАЦИИ ФРЕОНА-113 И ДИЭТИЛОВОГО ЭФИРА В ЭЛЕКТРСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ ПЕРФОРИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗКАХ. (Стена # 2).

Опытные данные о влиянии свойств жидкости на изменение теплообмена в электростатическом поле представлены на Рис.7 и Рис.8. При использовании слабополярной жидкости интенсификация теплоотдачи существенно меньше, чем при конденсации неполярной (Рис.7). Это подтверждается и расчетными значениями эффектов интенсификации. Представленная на Рис.8 зависимость свидетельствует о том, что механизм теплообмена при конденсации жидкостей с существенно различными электрофизическими свойствами одинаков. Из Рис.7 и Рис.8 следует, что с уменьшением $E_{кр}$ уменьшается возможность значительной интенсификации, поскольку в большей степени уменьшается электрическая прочность жидкостей. Это позволяет рекомендовать для применения интенсифицирующего действия аппараты и системы, в которых используются диэлектрические неполярные жидкости.

На рис.9 представлены результаты критериального обобщения опытных данных с учетом рекомендаций теоретического анализа. В Обобщение включены опытные данные других авторов по воздействию электростатического поля на теплообмен при конденсации диэлектриков. Экспериментальные данные обобщаются критериальной зависимостью

$$Nu_E = \left\{ 1 - 0,07 K_2^2 K^{0,33} Re_H^{-0,14} \left[1 - \left(\frac{K_2}{K_E} \right)^2 \right]^{0,33} \right\} Nu_0 + 0,024 Re_E K_2^3 \ln \left\{ 1,7 K_2^{-1} K^{0,17} Re_H^{-0,07} \left[1 - \left(\frac{K_2}{K_E} \right)^2 \right]^{0,17} \right\} \quad (17)$$

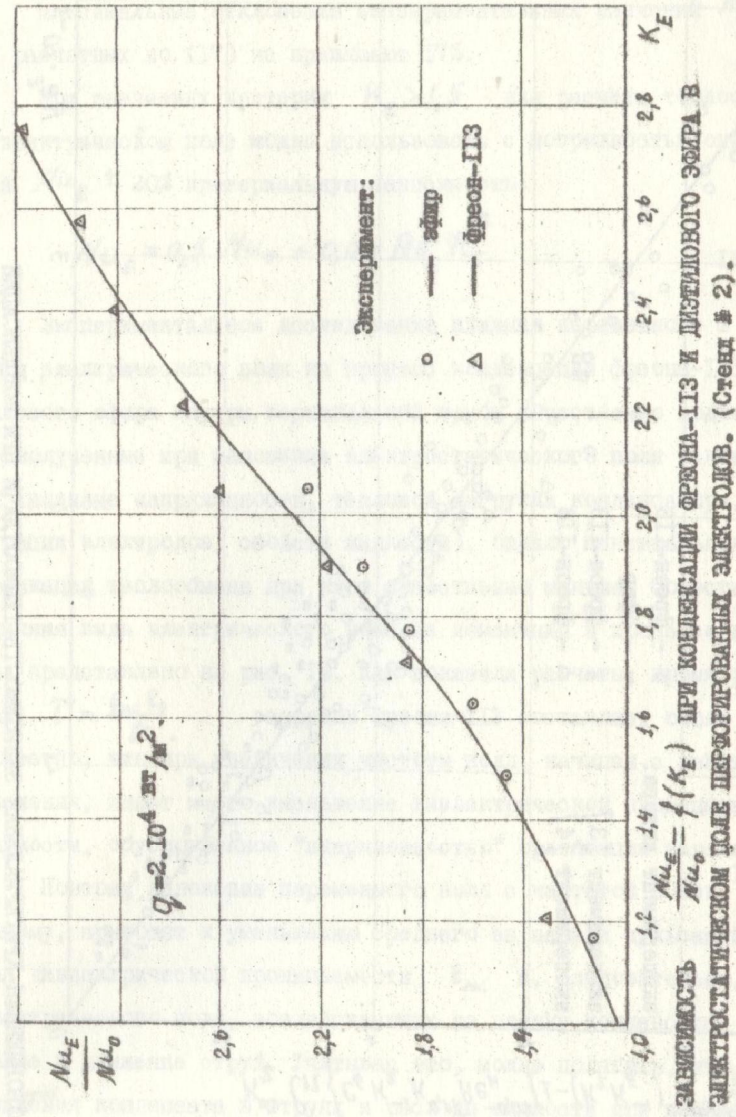


Рис. 8.

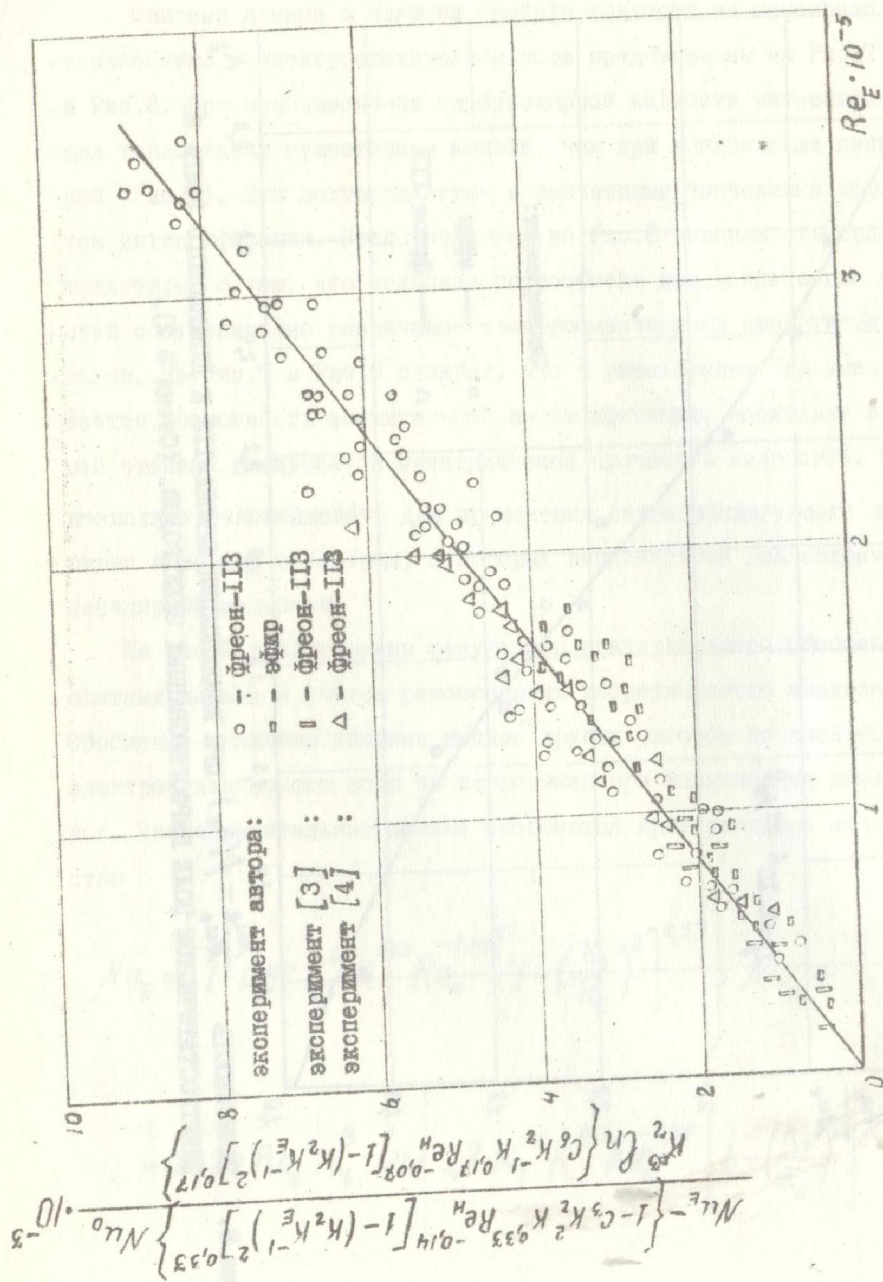


Рис. 9. ОБОБЩЕННАЯ КРИТЕРИАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ДИЭЛЕКТРИКОВ НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ.

Максимальные отклонения экспериментальных значений Nu_E от расчетных по (17) не превышают 17%.

При значениях критерия $K_E > 1,5$ для расчета теплоотдачи в электрическом поле можно использовать с погрешностью определения $Nu_E \pm 20\%$ критериальную зависимость:

$$Nu_E = 0,5 Nu_0 + 0,04 Re_E K_2^3 \quad (18)$$

Экспериментальное исследование влияния переменного с частотой 50гц электрического поля на процесс конденсации фреона-113 и диэтилового эфира внутри вертикальной трубы качественно подтверждает полученные при наложении электростатического поля закономерности (влияние напряженности, тепловой нагрузки конденсатора, конфигурации электродов, свойств жидкости), однако максимальная интенсификация теплообмена при этом существенно меньше. Сопоставление влияния вида электрического поля на изменения в процессе конденсации представлено на рис. 10. Как показали расчеты, время релаксации $\tau = \frac{\epsilon_{ж} \epsilon_0}{\rho}$ зарядов фреона-113 составляет около 1 сек. Известно, что при увеличении частоты поля, начиная с некоторого значения, имеет место уменьшение диэлектрической проницаемости жидкости, обусловленное "инерционностью" ориентации зарядов [9].

Поэтому наложение переменного поля с частотой 50сек⁻¹, видимо, приводит к уменьшению среднего за период пульсаций значения диэлектрической проницаемости $\epsilon_{ж}$ и, следовательно, сил электрического поля, воздействующих на пленку конденсата, формирование и движение струй. Учитывая это, можно полагать, что скорость движения конденсата в струях и расходы жидкости при переменном поле будут меньше, чем при постоянном.

Результаты экспериментального исследования взаимосвязанных процессов конденсации и испарения на обогреваемых электродах в

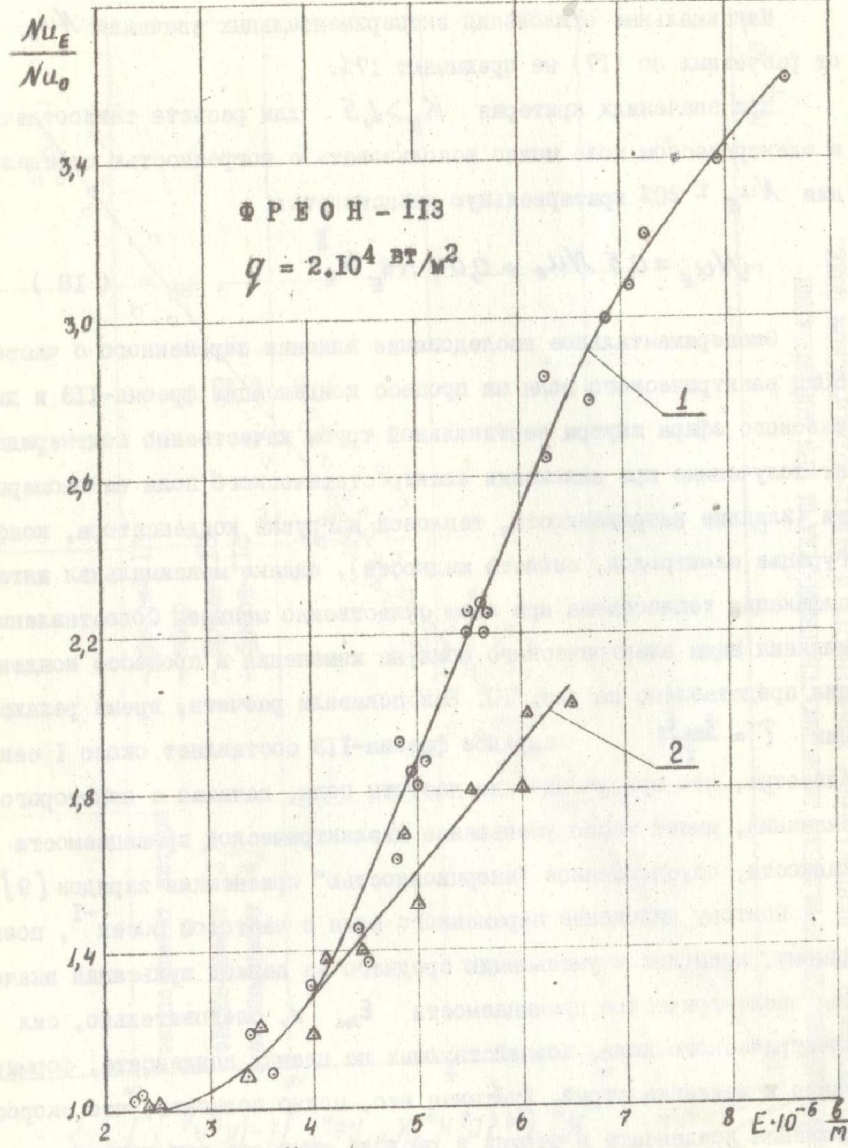


Рис. 10. ЗАВИСИМОСТЬ $\frac{Nu_E}{Nu_0} = f(E)$ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ФРЕОНА-113 В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ И ПЕРЕМЕННОМ ПОЛЕ ПЕРФОРИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ. (Стенд № 2).

1 - электростатическое; 2 - переменное.

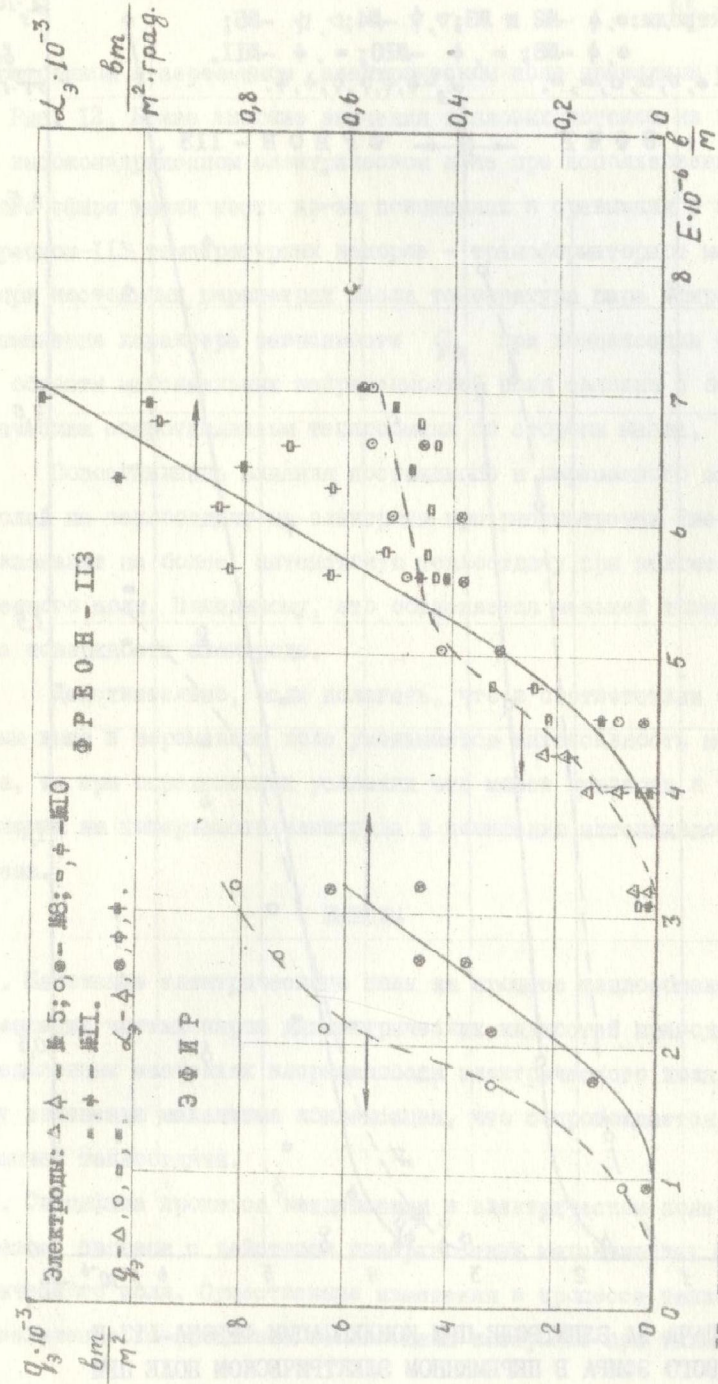


Рис. 11. ТЕПЛОТЛАЧА НА ЭЛЕКТРОДЕ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ФРЕОНА-113 И ДИЭТИЛОВОГО ЭФИРА В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ ПРИ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКЕ $q = 2 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$. (Стенд № 2)

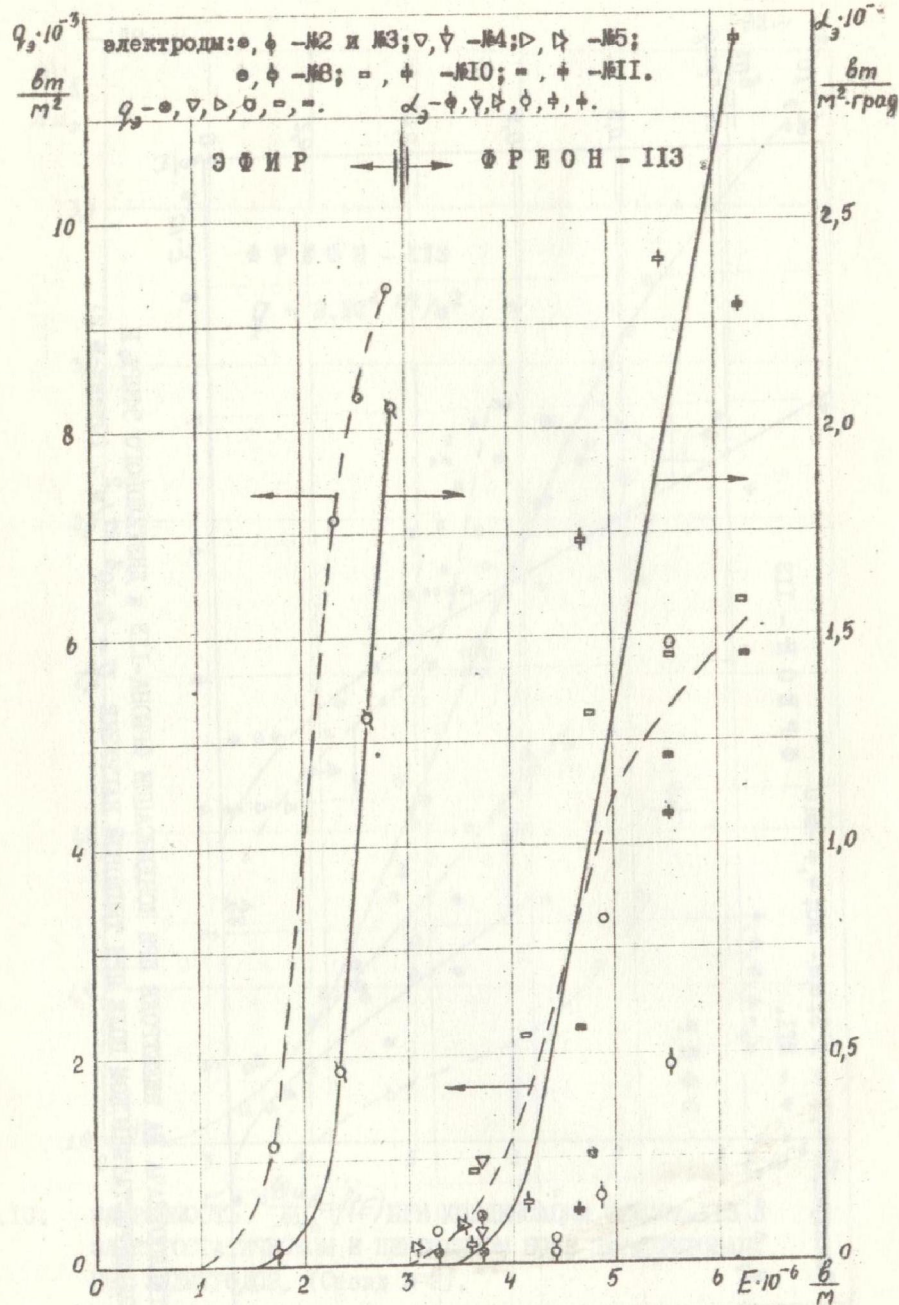


Рис.12. ТЕПЛОТДАЧА НА ЭЛЕКТРОДЕ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ФРЕОНА-II3 И ДИЭТИЛОВОГО ЭФИРА В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ ПРИ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКЕ $q_1 = 1,5 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$. (Стенд № 2)

постоянном и переменном электрическом поле приведены на Рис. 11 и Рис. 12. Более высокие значения тепловых потоков на электроде в высоконапряженном электрическом поле при использовании диэтилового эфира имели место из-за повышенных в сравнении с опытами с фреоном-II3 температурных напоров - трансформаторное масло - пар (при постоянных параметрах масла температура пара эфира была ниже). Изменение характера зависимости q_3 при конденсации фреона-II3 в области максимальных напряженностей поля связано с большим термическим сопротивлением теплообмена со стороны масла.

Сопоставление влияния постоянного и переменного электрических полей на теплоотдачу на электроде при рассмотрении Рис. 11 и Рис. 12 указывает на более интенсивную теплоотдачу при наложении переменного поля. Повидимому, это объясняется меньшей толщиной пленки на поверхности электрода.

Действительно, если полагать, что в соответствии с изложенным выше в переменном поле уменьшается интенсивность массопереноса, то при определенных условиях это может привести к утонению пленки на поверхности электрода и повышению интенсивности теплообмена.

ВЫВОДЫ

1. Наложение электрического поля на процесс теплообмена при конденсации чистых паров диэлектрических жидкостей приводит при определенных значениях напряженности электрического поля к коренному изменению механизма конденсации, что сопровождается интенсификацией теплоотдачи.
2. Специфика процесса конденсации в электрическом поле главным образом связана с действием поверхностных механических сил электрического поля. Существенные изменения в процессе теплообмена и увеличение коэффициента теплоотдачи наступают при таких напряжен-

ностях электрического поля, когда плотность поверхностных сил поля окажется достаточной для разрушения конденсатной пленки. Такая напряженность условно названа критической.

Приближенно значение критической напряженности может быть найдено по формуле

$$E_{кр} = K_1 \cdot \sqrt{\frac{2\psi \delta \sigma \epsilon_{жс}}{\epsilon_0 (\epsilon_{жс} - 1)}}$$

3. Эффекты интенсификации теплообмена при конденсации диэлектрика в электрическом поле существенным образом зависят от геометрии и ориентации поверхности теплообмена. Так, в случае плоской пластины при горизонтальном расположении и конденсации сверху можно ожидать большие эффекты теплоотдачи, чем при вертикальном.

При конденсации на поверхности горизонтальной трубы наоборот, максимальные эффекты интенсификации не превышают 20-40%, в то время как на вертикальной трубе электростатическое поле при конденсации фреона-113 дает увеличение коэффициентов теплоотдачи в ~3,6 раза, переменное с частотой 50Гц - в ~2раза.

4. При наложении переменного или пульсирующего поля по сравнению с электростатическим не наблюдается увеличения интенсификации теплообмена.

5. Нанесение на поверхности электродов источников концентрации напряженности поля не оказывает существенного влияния на теплообмен при конденсации чистых паров в электрическом поле.

6. Достижение максимальных эффектов интенсификации реализуемо прежде всего на слабополярных и в особенности на неполярных жидкостях типа фреонов.

7. "Струйная" модель механизма движения конденсата в паровом пространстве, связывающая процесс конденсации диэлектриков в электрическом поле при $E > E_{кр}$ с процессом образования, движения и взаимодействия с поверхностью теплообмена струй переохла-

денного конденсата качественно правильно описывает основные закономерности процесса теплообмена в этих условиях.

8. Обобщение на основе "струйной" модели процесса опытных данных настоящей работы и исследований других авторов приводит к критериальной зависимости (17).

Диапазоны изменения критериев:

$$0 < Re_E < 10^6; \quad 1 < K_E < 3,5; \quad 0,5 < K_2 \leq 1$$

Критериальная зависимость обобщает опытные данные для различных условий конденсации: слабополярная и неполярная жидкость, плоская вертикальная пластина-конденсатор и вертикальная труба-конденсатор, различные межэлектродные расстояния.

Для расчета теплоотдачи при конденсации диэлектриков на вертикальной поверхности в электростатическом поле при значении критерия $K_E > 1,5$ может быть использована с погрешностью определения $Nu_E \pm 20\%$ критериальная зависимость:

$$Nu_E = 0,5 Nu_0 + 0,04 Re_E K_2^3$$

9. При конденсации диэлектрика в электрическом поле перфорированных или обогреваемых электродов достигаются наибольшие эффекты интенсификации, что согласуется с "струйной" моделью процесса.

10. Экспериментальное исследование теплоотдачи на электроде при конденсации слабополярной и неполярной жидкости внутри вертикальной трубы в электрическом поле показало, что максимальные удельные тепловые потоки и коэффициенты теплоотдачи при испарении на электроде составляют: для фреона-113 в электростатическом поле соответственно $(5 \div 6) \cdot 10^3 \frac{Вт}{м^2}$ и $\sim 1200 \frac{Вт}{м^2 \cdot град}$, в переменном с частотой 50Гц - $\sim 6 \cdot 10^3 \frac{Вт}{м^2}$ и $\sim 2500 \frac{Вт}{м^2 \cdot град}$; для диэтилового эфира в электростатическом поле - $\sim 8 \cdot 10^3 \frac{Вт}{м^2}$ и $\sim (600 \div 700) \frac{Вт}{м^2 \cdot град}$;

в переменном $\sim 9 \cdot 10^3 \frac{\text{вт}}{\text{м}^2}$ и $\sim 1700 \frac{\text{вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$.

II. Экспериментальные данные и результаты обобщения могут быть использованы для организации процессов испарения и конденсации в испарительных системах охлаждения.

Обозначения

a - ширина зоны гравитационного стекания конденсата в пределах элементарной ячейки стенки; c_p - теплоемкость жидкости;
 E - напряженность электрического поля у поверхности конденсации;
 $E_{кр}$ - критическая напряженность электрического поля по (5);
 f_n - плотность поверхностных электрогидродинамических сил;
 f_σ - плотность сил поверхностного натяжения;
 G_c - расход жидкости;
 H - высота поверхности теплообмена; h - межэлектродное расстояние; K_1^* - волновое число по [7]; $l_c = 2h + \lambda^*$ - расчетная длина струи; q - удельный тепловой поток; q_3 - удельный тепловой поток при испарении на электроде; V - объем; R_c - радиус струи; Z - теплота парообразования; r_3 - наружный радиус электрода; r_k - радиус поверхности конденсации; t - температура;
 U - электрическое напряжение; W_E - средняя по сечению струи скорость течения конденсата под действием сил электрического поля; Z - коэффициент по (12); α - коэффициент теплоотдачи;
 α_3 - коэффициент теплоотдачи при испарении на электроде, отнесенный к поверхности электрода; α_c - коэффициент теплоотдачи при конденсации на струях жидкости; δ - удельная электропроводность конденсата; δ - толщина пленки конденсата; ϵ - диэлектрическая проницаемость среды; $\epsilon_{см}$ - диэлектрическая проницаемость парожидкостной смеси парового объема конденсатора при $E > E_{кр}$;
 χ - свободные заряды диэлектрика; ∇ - оператор Гамильтона;
 λ - коэффициент теплопроводности конденсата; λ^* - длина волн, имеющих наивысший темп развития неустойчивости; ν - коэффициент кинематической вязкости конденсата; ρ - плотность конденсата;
 σ - коэффициент поверхностного натяжения; τ - время релаксации; ψ - коэффициент, определяющий амплитуду волнового течения пленки по [7].

Индексы

E - величины, обусловленные воздействием электрического поля;
 N - теоретические значения в отсутствие электрического поля;
 ∂ - относят к поверхности электрода; K - к поверхности конденсатора; 0 - к отсутствию электрического поля; $ж$ - к жидкости;
 $п$ - к пару; $н$ - к насыщенному состоянию пара; c - к струйному течению конденсата; $\bar{\quad}$ - средние значения.

Константы

$$g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}; \quad \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ ф/м}; \quad C_1 = 0,018; \quad C_2 = 4,2;$$

$$C_3 = 0,07; \quad C_4 = 6,7; \quad C_5 = 2,85; \quad C_6 = 1,7; \quad C_7 = 0,035;$$

Критерии подобия

$$Nu_E = \frac{\alpha_E H}{\lambda}$$

$$Nu_0 = \frac{\alpha_N H}{\lambda}$$

$$Re_H = \frac{\rho H}{\tau \rho}$$

- критерий Нуссельта

- критерий Рейнольда
процесса конденсации

$$Re_E = \frac{H(\epsilon_{жс} - \epsilon_{см})E}{\sqrt{\epsilon_{жс}}} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\rho} \left[1 - \left(\frac{\epsilon_{жс}}{\epsilon} \frac{r_3}{r_k} \right)^2 \right]}$$

критерий Рейнольда
электрический

$$K = \frac{\sigma}{\mu} \frac{1}{(g\nu)^{1/3}}$$

- безразмерный комплекс

$$K_E = \frac{E}{K_1^*} \sqrt{\frac{\epsilon_0(\epsilon_{жс} - 1)}{2\psi\delta\sigma\epsilon_{жс}}}$$

- критерий напряженности электрического поля

$$K_2 = \frac{r_3}{r_k}$$

- геометрический симплекс

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Абросимов Ю.Г., Исаченко В.П., Солодов А.П.. Доклады научно-технической конференции МЭИ по итогам научно-исследовательских работ за 1968-1969 г.г. Москва 1969.
2. Бузник В.М., Смирнов Г.Ф., Замкевич Б.М. Сб. "Труды Николаевского кораблестроительного института". 1968. вып. 26.
3. Велкофф, Миллер. Теплопередача. Серия С., 1965, № 2.
4. Дидковский А.Б., Болога М.К. Электронная обработка материалов. 1971, № 3. 1973 № 1.
5. Замкевич Б.М. Электронная обработка материалов. 1970, № 1. 1973, № 3.
6. Исаченко В.П., Солодов А.П., Самойлович Ю.З., Кушнырев В.И., Сотсков С.А.. Теплоэнергетика. 1971, № 2.
7. Капица П.Л. ЖЭФ. 1948, т.18, вып. 1.
8. Накоряков В.Е., Бурдуков А.П., Покусаев Б.Г. Исследование турбулентных течений двухфазных сред. Новосибирск. 1973.
9. Поль Р.В. Учение об электричестве. Физматгиз. 1962.
10. Холмс, Чэпмен. Теплопередача. Серия С, 1970, № 4.
11. Чанг-О, Ли, Чэй. Теплопередача. Серия С, 1968, № 3.
12. Чэй. Теплопередача. Серия С, 1968, № 1.

МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ:

1. Инженерно-физический журнал, том XXI, № 2, 1971
"Определение критической напряженности электростатического поля для падающей пленки жидкого диэлектрика"
2. Электронная обработка материалов, № 3, 1973
"Исследование теплоотдачи при конденсации фреона-II в электрическом поле"

МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИИ ДОЛОЖЕНЫ

1. На III Всесоюзном совещании по влиянию электрического поля на процессы, Кишинев, 1972.
2. На XVI Сибирском теплофизическом семинаре. Новосибирск, 1973.

БР 04741 22.04.74 г. Формат 60 x 84 I/I6
Объем 2,75 п.л. Заказ № 1297 Тираж 200 экз.
Городская типография управления по делам издательств, полиграфии и книжной торговли Одесского облисполкома.

г. Одесса, Ленина, 49