

Автореф
Б 20

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ПИЩЕВОЙ И ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Аспирант БАЛИЦКИЙ С. А.

W
НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ
В МОДЕЛИ РЕГЕНЕРАТОРА
БРОМИСТО- И ХЛОРИСТОЛИТИЕВЫХ
ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель—
доктор технических наук,
проф. ЧЕРНОБЫЛЬСКИЙ И. И.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ПИЩЕВОЙ И ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Аспирант БАЛИЦКИЙ С. А.

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

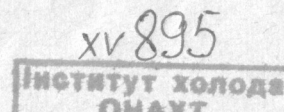
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ
В МОДЕЛИ РЕГЕНЕРАТОРА
БРОМИСТО- И ХЛОРИСТОЛИТИЕВЫХ
ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель —
доктор технических наук,
проф. Чернобыльский И. И.



Одесса
1959



Работа выполнена в лаборатории теплообмена и теплообменных аппаратов Института теплоэнергетики Академии наук УССР.

Основные положения диссертации изложены в сборнике «Теплообмен и гидродинамика», (Труды Института теплоэнергетики АН УССР, № 14, 1958 г.), а также в монографии И. И. Чернобыльского, О. А. Кремнева и А. С. Чавдарова «Теплоиспользующие установки для кондиционирования воздуха», Киев, 1958 г., в которой диссертант является соавтором главы XI.

В настоящее время наиболее широко распространены у нас установки для кондиционирования воздуха, в которых холод вырабатывается в компрессорных холодильных машинах за счет электроэнергии. Большой интерес представляют теплоиспользующие установки, работающие за счет тепла ТЭЦ.

Имеются данные (л. 1) о водяной абсорбционной холодильной машине, в которой в качестве абсорбента использовался раствор LiBr . В этой машине при паровом обогреве регенератора достигнуто охлаждение воды до $+2^\circ\text{C}$ при высоком коэффициенте использования тепла $\approx 0,72$. Водяные абсорбционные машины более экономичны, чем аммиачные, вследствие более высоких температур испарения хладагента, отсутствия ректификаторов и ничтожного испарения абсорбента. Преимущества воды как хладагента и раствора твердой соли как абсорбента очевидны.

Однако, судя по литературным данным, эти машины рассчитаны на применение пара для обогрева регенератора, что значительно сужает возможность их применения. В то же время, если проводить регенерацию раствора под вакуумом, порядка $0,06\text{--}0,07$ атм, представляется возможным использовать для обогрева регенератора воду с температурой $80\text{--}90^\circ\text{C}$, т. е. можно использовать для этой цели теплофикационную воду ТЭЦ. Это позволит значительно расширить область применения таких установок.

Существует и другой вариант теплоиспользующей машины для кондиционирования воздуха с непосредственным поглощением паров из воздуха химическими поглотителями в осушающей части кондиционной камеры и последующим охлаждением и увлажнением воздуха до требуемых кондиций в увлажнительной части. В качестве жидкого поглотителя получил применение раствор LiCl . В такой машине разбавленный раствор также подвергается восстановлению в регенераторе, причем, чтобы можно было использовать для обогрева регенератора теплофикационную воду ТЭЦ, процесс кипения должен происходить под вакуумом.

Идея обогрева регенератора теплофикационной водой разработана в Институте теплоэнергетики АН УССР, где на лабораторных установках в течение нескольких лет велись испытания (л. 2). Полученные результаты позволяют ставить

в настоящее время вопрос о создании первых промышленных образцов разработанных установок.

Как видно из вышеизложенного, как в первой, так и во второй установке существенным узлом является регенератор. Для расчета и конструирования таких машин важное значение имеет знание коэффициента теплоотдачи к кипящим водным растворам LiCl и LiBr.

Следует отметить, что водные растворы LiCl и LiBr могут найти применение не только в установках для кондиционирования воздуха, но и в теплонасосных установках, для низкотемпературной теплофикации и др. (л. 2). Наличие в этих установках аппаратов, в которых происходит процесс упаривания растворов, требует знания коэффициентов теплоотдачи при их кипении.

В связи с вышеизложенным в комплексе работ по исследованию упомянутых установок и было проведено данное исследование теплоотдачи при кипении водных растворов LiCl и LiBr.

Исследование было проведено при кипении растворов в большом объеме на горизонтальной теплоотдающей поверхности — латунной трубке с нормально-окисленной технической поверхностью, что характерно для промышленной аппаратуры упомянутых установок.

При выборе параметров эксперимента руководствовались соображениями о необходимости исследования при наиболее вероятных их значениях в промышленных аппаратах. В целях накопления экспериментальных данных программа испытаний была расширена. Опыты были проведены в диапазоне изменения тепловой нагрузки от 3750 до 25000 ккал/м²час.

Концентрации и значения давлений, при которых производились исследования, приведены в нижеследующей таблице.

Рабочая жидкость	Концентрация, в %	Давление P, атм					
		0,05	0,1	0,3	0,8	1,0	
Раствор LiCl	10	0,05	0,1	0,3	0,8	1,0	
	20	0,05	0,1	0,3	0,8	1,0	
	30	0,05	0,1	0,3	0,8	1,0	
	40	0,05	0,1	0,3	0,8	1,0	
Раствор LiBr	10	0,05	0,1	0,3	0,5	0,8	1,0
	20	0,05	0,1	0,3	0,5	0,8	1,0
	30	0,05	0,1	0,3	0,5	0,8	
	40	0,05	0,1	0,3	0,5		
	50	0,05	0,1	0,3			
	60	0,05	0,1	0,3			

Исследование имело своей целью:

1. Получить экспериментальные данные при кипении растворов LiCl и LiBr в большом объеме на горизонтальной трубке.

2. Установить:

а) зависимость коэффициента теплоотдачи от величины теплового потока;

б) влияние концентрации на интенсивность теплоотдачи;

в) зависимость теплоотдачи от давления.

3. Установить возможность обобщения полученных данных в критериальных зависимостях и выяснить таким образом, какие из этих уравнений могут быть использованы как расчетные для определения коэффициента теплоотдачи.

4. В свете полученных данных рассмотреть, проанализировать и рекомендовать пути интенсификации теплообмена в регенераторах теплоиспользующих установок при кипении в них растворов LiCl и LiBr.

I.

Исследования проводились на специально сооруженном стенде, принципиальная схема которого изображена на рис. 1.

Стенд представлял собой замкнутый контур, что обеспечивало постоянство концентраций раствора в процессе опыта.

Для поддержания вакуума в системе вакуум-насосом 22 производился непрерывный отсос воздуха из конденсатора 8 через ресивер 9. Изменение, а также поддержание разрежения в системе обеспечивалось специально организованным подсосом воздуха через зажим 10.

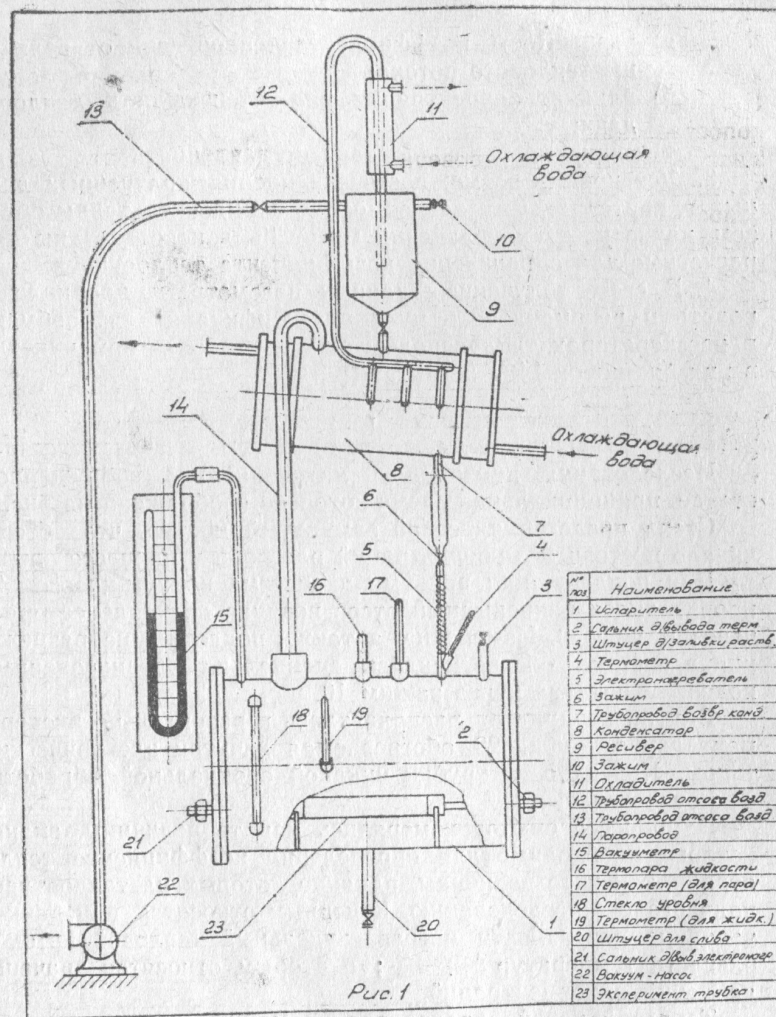
Внутри испарителя располагалась горизонтально экспериментальная трубка 23, обогреваемая изнутри электрическим током. Поверхность трубки никакой специальной обработке не подвергалась.

В процессе опытов измерялись как те величины, знание которых необходимо для определения коэффициента теплоотдачи, так и те величины, влияние которых на теплоотдачу подвергалось исследованию. К первым относятся, при данной величине поверхности нагрева, удельный тепловой поток и разность температур $t_{см.} - t_{ж.}$; ко вторым относятся значения давлений и концентраций.

Тепловой поток определялся по мощности, потребляемой электрическим нагревателем экспериментальной трубки и измеряемой лабораторным ваттметром.

Разность температур стенка-жидкость определялась по показаниям восьми медно-константановых термопар, заложённых в тело экспериментальной трубки, которые как дифференциальные подсоединялись через переключатель с тер-

мопарой, измеряющей температуру кипящей жидкости. По длине кипяtilьной трубки термопары были заложены в двух сечениях в наиболее характерных точках по окружности тру-



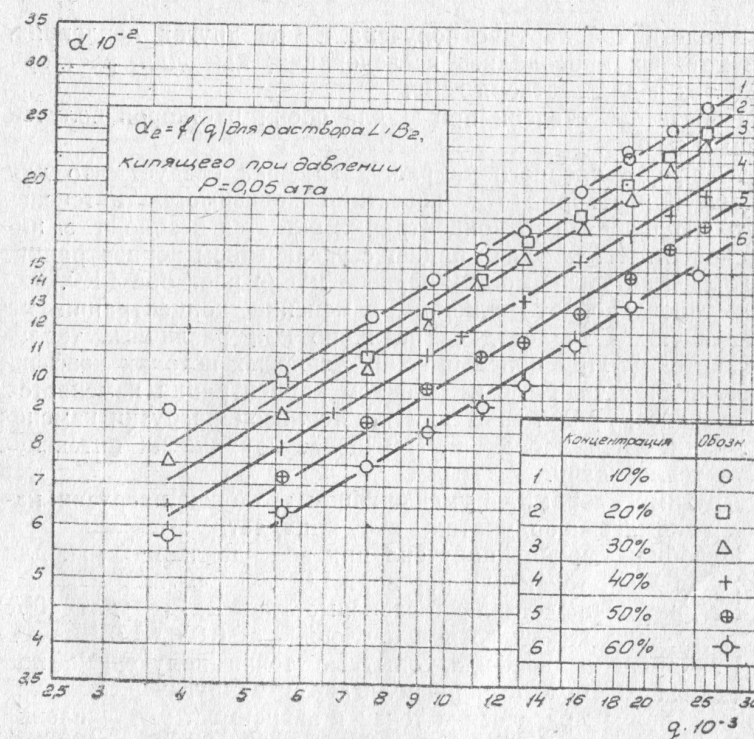
бы. Температура по длине трубки практически оставалась постоянной. Измерение э.д.с. термопар производилось компенсационным методом с точностью до 0,01 мв, что составляло в наших условиях $\pm 0,25^\circ\text{C}$.

Концентрация раствора определялась по таблицам плотности — концентрация — температура. Контрольные замеры

концентрации производились перед началом и в конце серии опытов (при данном давлении).

II.

Перед началом испытаний по основной программе, было проведено исследование теплоотдачи при кипении воды. Цель этого исследования заключалась в том, чтобы путем сопоставления полученных данных по α с данными, имеющимися в литературе, проверить правильность работы узлов установки и контрольно-измерительной аппаратуры. Такое сопоставление данных по α показало близкое совпадение их, подтвердив тем самым надежность и правильность работы опытной установки. В процессе опытов по кипению воды была уточнена и сама методика проведения эксперимента.



Основные опыты по кипению растворов были проведены в двух сериях: 1-я серия — опыты по кипению растворов LiCl, 2-я серия — опыты по кипению растворов LiBr.

На основании полученных опытных данных установлена зависимость интенсивности теплоотдачи от тепловой нагрузки, давления и концентрации.

Данные обеих серий опытов обработаны в координатах $\alpha - q$ и приведены в виде логарифмических графиков. Показатель степени при q найден по методу наименьших квадратов.

На рис. 2 в логарифмических координатах $\alpha - q$ представлены результаты опытов для шести различных концентраций раствора LiBr, кипящего при давлении $P = 0,05$ ата. Как видно из графика, экспериментальные точки достаточно хорошо укладываются на прямые линии, выражаемые уравнением вида

$$\alpha = c \cdot q^n.$$

Аналогичная картина получена и при других давлениях, при которых проводились исследования, как для раствора LiCl, так и для раствора LiBr.

Показатель степени при q для обоих растворов получен равным $\approx 0,63$.

Из представленного на рис. 2 графика следует, что для кипящего раствора LiBr известная зависимость интенсивности теплоотдачи от концентрации остается в силе, т. е. интенсивность теплоотдачи падает с увеличением концентрации. Аналогичная зависимость получена и для раствора LiCl.

Установлено, что влияние изменения концентрации на интенсивность теплоотдачи различно при различных тепловых потоках. При более высоких тепловых потоках коэффициент теплоотдачи α с изменением концентрации изменяется более резко; при уменьшении же тепловой нагрузки изменение концентрации оказывает меньшее влияние на интенсивность теплоотдачи.

Другими словами, с уменьшением тепловой нагрузки наклон кривых в координатах $\alpha = f(\xi)$ падает.

Подобная картина получена при всех давлениях как для раствора LiCl, так и для раствора LiBr.

На рис. 3 представлена зависимость $\alpha = f(q)$ для 40% раствора LiCl, кипящего при давлениях от 0,05 до 0,1 ата.

Как видно из графика, опытные точки полученные при давлениях 0,05—1,0 ата, располагаются вокруг усредняющей прямой, причем расслоение точек в зависимости от давления отсутствует. Это говорит о том, что в области давлений 0,05—1,0 ата зависимости теплоотдачи от давления не обнаружено; точки, полученные при давлении 0,1 ата, ложатся рядом с точками, соответствующими атмосферному давлению. Через всю группу точек для 0,05—1,0 ата и любой концентрации раствора LiCl или LiBr можно провести одну

прямую, которая и описывает процесс теплоотдачи при кипении раствора данной концентрации в данном диапазоне давлений. Независимость интенсивности теплоотдачи от давления наблюдалась для всех концентраций раствора LiCl и раствора LiBr.

Следует отметить, что с увеличением концентрации раствора разброс опытных точек вокруг усредняющих прямых уменьшается.

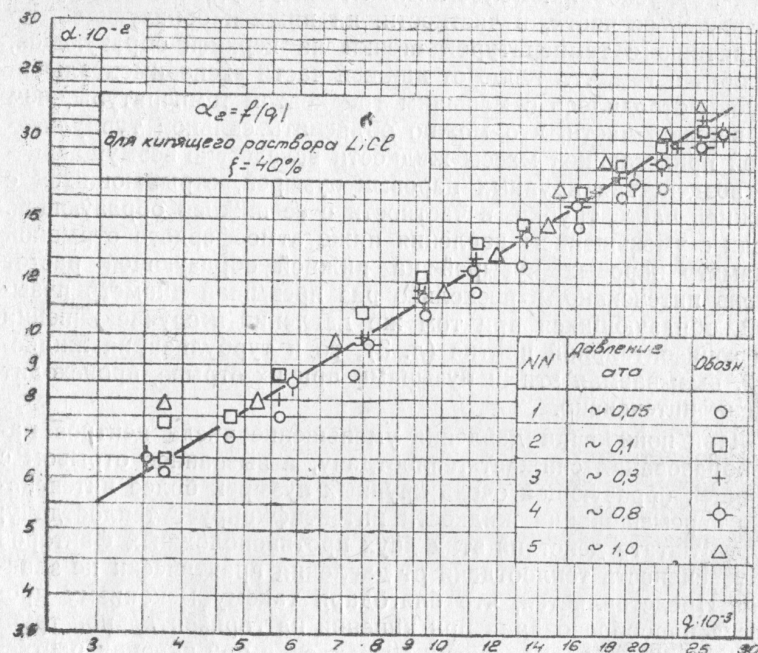


Рис. 3

Независимость теплоотдачи от давления наблюдалась и другими исследователями при кипении в большом объеме на горизонтальной технической трубке растворов сахара в области низких и средних тепловых потоков и диапазоне давлений от 1,0 до 0,1 ата (л. 3).

Отсутствие зависимости теплоотдачи от давления при кипении растворов сахара объяснялось особыми условиями образования, роста и всплывания паровых пузырей на нижней части цилиндрической поверхности.

Как показано в работе (3), отрывной диаметр пузырей на нижней части экспериментальной трубки значительно больше, чем на верхней, причем с уменьшением давления

отрывной диаметр парового пузыря на нижней части цилиндрической поверхности увеличивается значительно быстрее, чем на плоской горизонтальной поверхности.

Анализ распределения температуры по сечению экспериментальной трубки показывает, что в настоящем исследовании гидродинамика процесса кипения оставалась такой же, какая наблюдалась и при кипении растворов сахара в аналогичных условиях. Более низкая температура стенки трубки в нижней ее части, в частности, на нижней образующей, по сравнению с температурой стенки на верхней образующей, говорит о том, что тепло от нижней части экспериментальной трубки отводилось с меньшим градиентом температуры, чем на верхней части, что можно объяснить сильной турбулизацией прилегающей массы жидкости вследствие возмущающего воздействия крупных паровых пузырей, отрывающихся с нижней части трубки, в частности с ее нижней образующей. Если с уменьшением давления ниже атмосферного отрывной диаметр паровых пузырей на нижней образующей растет очень интенсивно, в несколько раз превышая диаметр пузырей, образующихся при том же давлении в случае кипения на горизонтальной плитке (л. 3), то и турбулизация жидкости, вызываемая этими пузырями при их отрыве, происходит очень интенсивно.

При понижении давления уменьшение числа центров парообразования снижает теплоотдачу, а вызванное отрывом с нижней образующей очень крупных пузырей более интенсивное перемешивание жидкости интенсифицирует теплоотдачу; в результате действия этих двух противоположных факторов интенсивность теплоотдачи от давления практически не зависит. Представляется, что благодаря такому механизму процесса парообразования при кипении на горизонтальной трубке зависимости теплоотдачи от давления при кипении растворов LiCl и LiBr не обнаружено.

Тот факт, что при аналогичных же условиях опыта при кипении воды обнаружено падение интенсивности теплоотдачи с понижением давления, позволяет высказать предположение, что независимость интенсивности теплоотдачи от давления в условиях, имевших место в настоящем исследовании, характерна, повидимому, только для кипящих вязких жидкостей (более вязких, чем вода); в первую очередь для различных растворов. Некоторым подтверждением этого положения является то обстоятельство, что разброс точек вокруг усредняющей прямой (рис. 3) значительно уменьшается с увеличением концентрации раствора.

Следует отметить, что в ЦКТИ проводились исследования теплоотдачи при кипении растворов LiCl и LiBr в диапазоне тепловых нагрузок $30 \cdot 10^3 - 200 \cdot 10^3$ ккал/м²час и давлений

0,15—1,0 ата. Сравнение данных настоящего исследования с данными ЦКТИ показало хорошее согласование их (рис. 4).

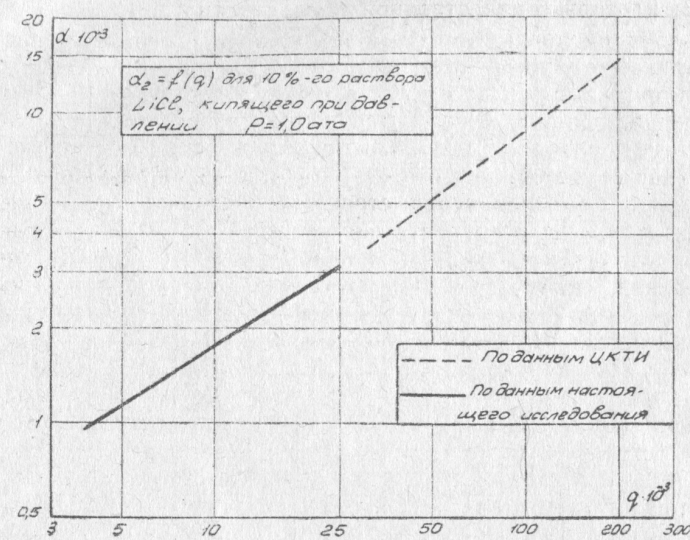


Рис. 4

III.

Опытные данные настоящего исследования по кипению растворов LiCl и LiBr были обработаны в критериальной зависимости В. И. Толубинского (л. 4)

$$Nu = 54K^{0,6}Pr^{-0,3} \quad (1)$$

и М. А. Кичигина — Н. Ю. Тобиловича (л. 5)

$$Nu = 3,25 \cdot 10^{-4} Pe^{0,6} Ga^{0,125} K_p^{0,7} \quad (2)$$

Опытные данные по кипению растворов LiCl, обработанные в критериальном уравнении (1), представлены на рис. 5; опытные данные по кипению растворов LiBr, обработанные в критериальном уравнении (2), представлены на рис. 6.

Для всех полученных графиков характерна определенная закономерность в расположении точек вокруг прямых, выражаемых уравнениями (1, 2).

Точки, полученные при 0,05 и 1,0 ата, располагаются на 35—55% выше них; точки для 0,3 и 0,5 ата удовлетворительно описываются уравнениями (1, 2); точки же, полученные при 0,8 и 1,0 ата, ложатся на 20—30% ниже прямых, соответствующих уравнениям (1, 2). Следовательно, для всего

интервала давлений 0,05—1,0 ата, полученные результаты по кипению растворов обобщаются критериальными уравнениями (1, 2) только качественно.

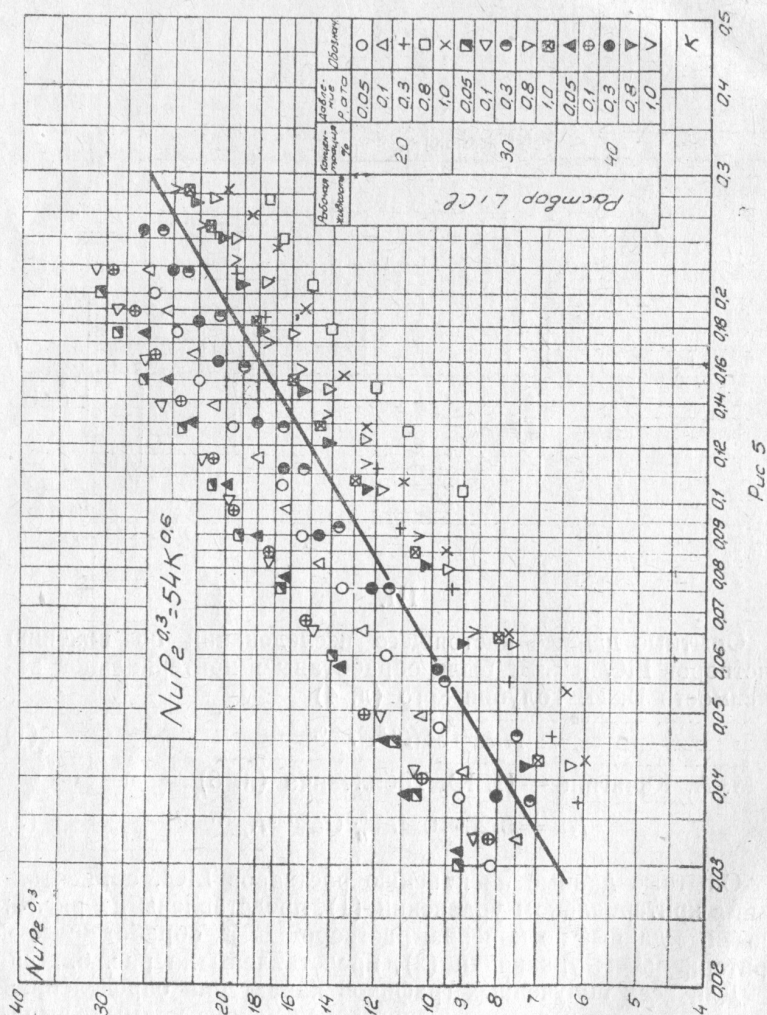


Рис 5

Как известно, критериальные уравнения (1, 2) хорошо обобщают опытные данные по кипению внутри вертикальной трубы при оптимальном режиме и на плоской плите в условиях большого объема, отражая падение интенсивности теплоотдачи с понижением давления. Своеобразная гидродина-

мика кипения растворов на горизонтальной трубке, обусловившая независимость интенсивности теплоотдачи от давления, и привела к такому расслоению точек вокруг критериальных прямых.

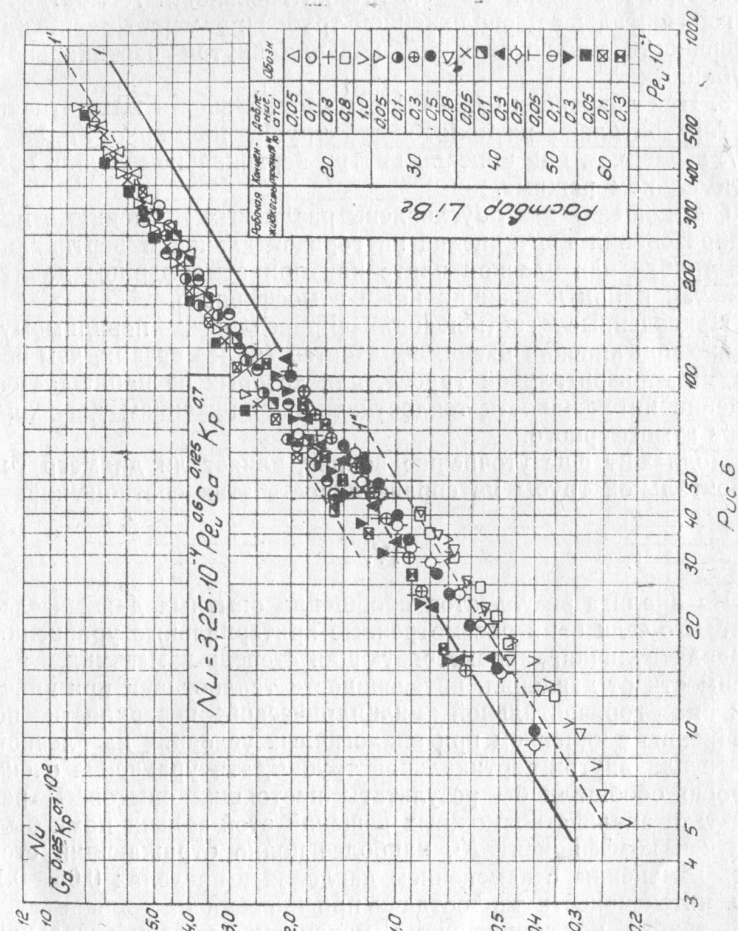


Рис 6

Если учесть, что рассмотренные критериальные уравнения описывают процесс теплоотдачи при кипении внутри вертикальной трубки в условиях оптимального режима или на плоской плите, то при анализе результатов обобщения можно сделать важный вывод о влиянии положения цилиндрической поверхности на теплоотдачу при различных давлениях для кипящих растворов LiCl и LiBr, а именно:

1. При давлениях 0,8—1,0 *ата* интенсивность теплоотдачи от горизонтально расположенной трубки на 20—30% меньше, чем при кипении внутри вертикальной трубки в условиях оптимального режима.

2. При давлениях 0,3—0,5 *ата* интенсивность теплоотдачи от горизонтально расположенной трубки примерно равна интенсивности теплоотдачи при кипении внутри вертикальной трубки.

3. При давлениях 0,05—0,1 *ата* интенсивность теплоотдачи от горизонтально расположенной трубки примерно на 35—55% выше, чем при кипении внутри вертикальной трубки при оптимальном режиме.

Соотношения эти обусловлены различными условиями парообразования при кипении на горизонтальной и вертикальной трубке или плоской плите как при атмосферном давлении, так и при давлениях ниже атмосферного.

Приведенные соотношения справедливы, повидимому, только при кипении вязких жидкостей (более вязких, чем вода) на горизонтальной трубке, для которых не наблюдается падение интенсивности теплоотдачи с понижением давления ниже атмосферного.

Подлежит еще уточнению вопрос, влияет ли диаметр горизонтальной трубы на справедливость этих соотношений.

IV.

Из анализа результатов обобщения опытных данных следует, что если бы в рассмотренные критериальные уравнения входила величина, характеризующая степень изменения, в зависимости от давления, интенсивности теплоотдачи при кипении на горизонтальной цилиндрической поверхности по сравнению с кипением при аналогичных условиях на плоской плите или внутри вертикальной трубки, эти уравнения очень хорошо обобщали бы результаты настоящих опытов. В результате анализа возможных решений этой задачи нами был получен коэффициент K_1 , наиболее полно отражающий степень изменения, с изменением давления в пределах 0,05—0,1 *ата*, интенсивности теплоотдачи при кипении на горизонтальной трубке по сравнению с кипением на горизонтальной плите.

Этот коэффициент представляет собой степенное отношение давлений

$$K_1 = \left(\frac{0,4P}{P_1} \right)^{0,2},$$

где P — атмосферное давление, равное 1 *ата*.

P_1 — рабочее давление в испарителе (регенераторе).

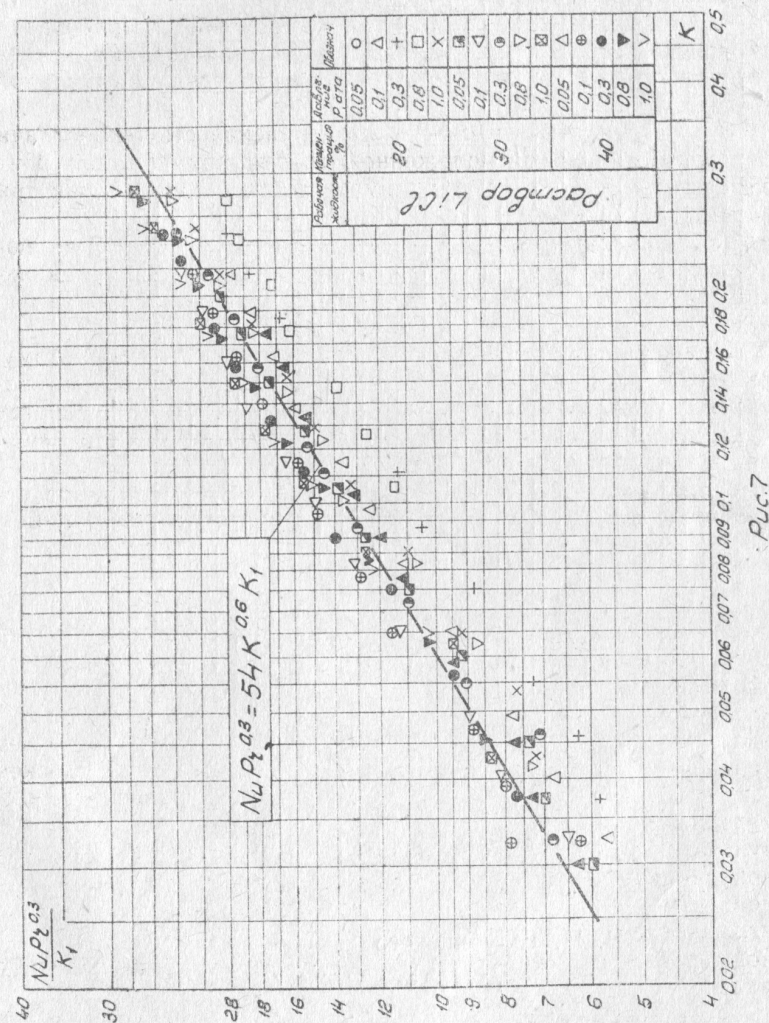
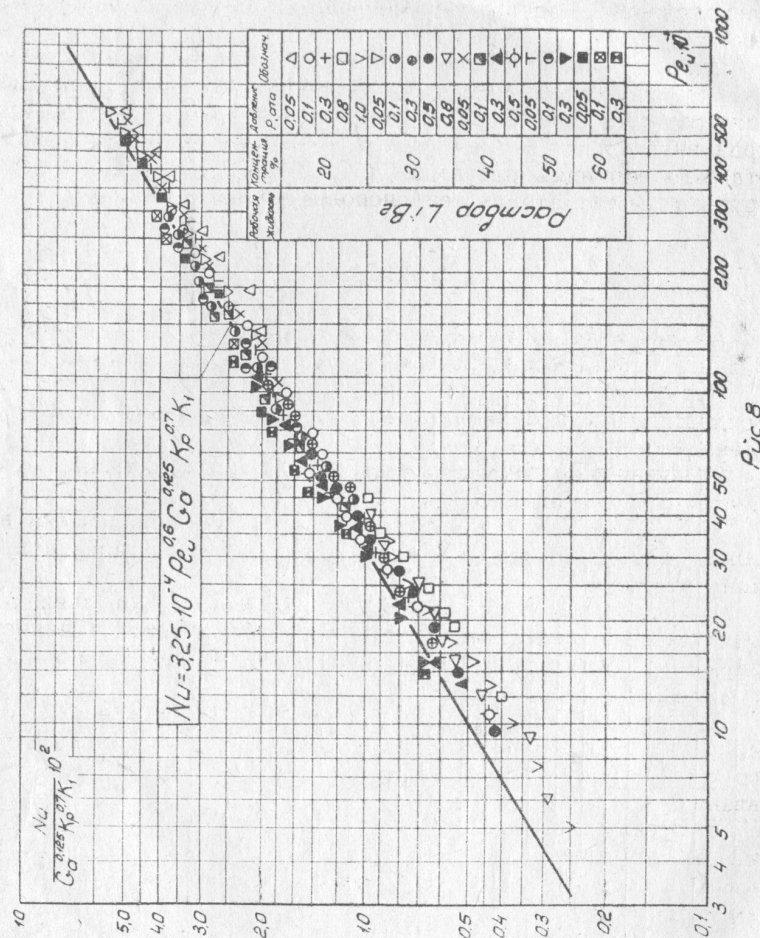


Рис. 7

При введении полученного коэффициента K_1 в правую часть рассмотренных критериальных уравнений последние приобретают вид:



уравнение В. И. Толубинского

$$NuPr^{0.3} = 54K^{0.6} \cdot K_1 \quad (3)$$

уравнение М. А. Кичигина — Н. Ю. Тобиленевича

$$Nu = 3,25 \cdot 10^{-4} Pe^{0.6} Ga^{0.125} K_p^{0.7} \cdot K_1 \quad (4)$$

Результаты опытных данных по кипению раствора LiCl, обработанные в критериальном уравнении (3), представлены

на рис. 7; на рис. 8 приведены результаты обобщения в критериальном уравнении (4) опытных данных по кипению раствора LiBr. Как видно, преобладающее большинство точек расположились вокруг усредняющих прямых с разбросом 0—14%.

Таким образом, введение коэффициента K_1 в рассмотренные критериальные уравнения позволяет обобщить опытные данные, что в свою очередь дает возможность рекомендовать уравнения (3) и (4) для определения коэффициентов теплоотдачи к кипящим растворам LiCl и LiBr в горизонтально-трубных регенераторах теплоиспользующих установок.

ВЫВОДЫ

Анализ литературных данных и проведенное экспериментальное исследование позволяют сделать ряд выводов.

1. Установлено, что для кипящих растворов LiCl и LiBr теплоотдача пропорциональна величине теплового потока в степени 0,63.

2. Интенсивность теплоотдачи падает с увеличением концентрации растворов.

3. Зависимости теплоотдачи от давления практически не обнаружено во всем исследованном диапазоне давлений и концентраций.

4. Независимость интенсивности теплоотдачи от давления для кипящих растворов LiCl и LiBr объясняется в данном случае особыми условиями парообразования при кипении растворов на горизонтальной трубке.

5. Представляется, что независимость интенсивности теплоотдачи от давления в области давлений ниже атмосферного характерна только для кипящих вязких жидкостей (более вязких, чем вода).

6. В силу своеобразной гидродинамики кипения растворов на горизонтальной трубке полученные опытные данные обобщаются существующими критериальными уравнениями только качественно.

7. Анализ результатов обобщения полученных данных по кипению растворов позволил установить, что интенсивность теплоотдачи от горизонтальной трубы и горизонтальной плиты (или вертикальной трубки при кипении внутри последней в условиях оптимального режима) при одних и тех же условиях опыта не одинакова, причем разность эта зависит от давления.

8. В результате установленных соотношений интенсивности теплоотдачи от горизонтальной плиты и трубы получен коэффициент K_1 представляющий собой степенное отношение давлений и численно равный отношению интенсивности

теплоотдачи от горизонтальной трубки к интенсивности теплоотдачи от горизонтальной плиты (или вертикальной цилиндрической поверхности).

9. При введении полученного коэффициента K_1 в правую часть критериальных уравнений В. И. Толубинского и М. А. Кичигина—Н. Ю. Тобилевича эти уравнения очень хорошо обобщают полученные результаты опытов по кипению растворов LiCl и LiBr на горизонтальной трубке, в силу чего они и рекомендуются как расчетные для определения коэффициентов теплоотдачи.

10. На основании полученных закономерностей при кипении растворов LiCl и LiBr на горизонтальной трубке даны рекомендации по интенсификации теплообмена в регенераторе теплоиспользующих холодильных установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Berestneff A. A., «Refrigerating Engineering», vol. 57, No 6, 1949.
2. И. И. Чернобыльский, О. А. Кремнев, А. С. Чавдаров, «Теплоиспользующие установки для кондиционирования воздуха», Киев, 1958.
3. И. Э. Венераки, Кандидатская диссертация, Киевский политехнический институт, 1953.
4. В. И. Толубинский, «Сборник трудов Института теплоэнергетики АН УССР», № 5, 1952.
5. М. А. Кичигин, Н. Ю. Тобилевич, «Сборник работ Киевского филиала ЦИНС», 1946—1949 гг., 1951.