

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ С С С Р

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

АБРАМОВ А.И.

На правах рукописи

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ
ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ КИПЕНИИ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ
ОРГАНИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ НА ПОГРУЖЕННЫХ
ПОВЕРХНОСТЯХ И В ТРУБАХ

(Специальность № 270 - Общая энергетика)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском ордена Ленина Энергетическом институте на кафедре тепловых электрических станций.

Научный руководитель докт. техн. наук проф. СЕРМАН Л.С.

Официальные оппоненты:

Докт. техн. наук ПОВАРИН П.И.

Канд. техн. наук ст. н. ст. КОВАЛЕВ С.А.

Ведущее предприятие указано в решении Ученого Совета

Автореферат разослан " " 1968 г.

Защита состоится в 1968 г. на Совете при Московском ордена Ленина Энергетическом институте.

Отзывы в 2-х экземплярах просим направлять по адресу Москва, Е-250, Красноказарменная ул., д.14 Совет МЭИ

Дата защиты будет объявлена в газете "Вечерняя Москва"

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь

доцент В.АКСЕНОВ

Надежность работы и технико-экономические показатели различных парогенерирующих устройств в значительной мере определяются организацией процесса теплообмена.

В теплообменные расчеты двухфазных систем входит и определение критических тепловых потоков $q_{кр}$, при достижении которых происходит резкое снижение коэффициентов теплопередачи вследствие перехода к пленочному режиму кипения. Такие расчеты особенно важны для высоконапряженных поверхностей нагрева.

В настоящее время удовлетворительные представления о механизме возникновения кризиса кипения и расчетные зависимости для определения величин $q_{кр}$ имеются только для случая кипения однокомпонентных жидкостей. Между тем, широкое применение начинают получать бинарные и многокомпонентные смеси органических теплоносителей. В некоторых случаях оказывается целесообразным применять смесь высококипящей и низкокипящей органической жидкости. Применяемые в настоящее время высококипящие органические теплоносители (ВОТ) класса полифенилов разлагаются под действием пиролиза и радиолитического разложения, образуя различные газообразные высококипящие и низкокипящие соединения.

Таким образом, в реальном теплообменном аппарате, использующем ВОТ, теплоотдача осуществляется нередко многокомпонентной смесью. Применение систем очистки и регенерации приводит лишь к стабилизации состава этой смеси. Поэтому изучение теплообмена при кипении смесей приобретает важную роль. Однако изучение теплообмена и кризиса кипения для двух- и многокомпонентных систем по существу еще только начинается, и проведенные экспериментальные исследования являются недостаточными.

Результаты первых исследований по кризису кипения бинарных смесей были опубликованы в 1956-1959 г.г. [1,2,3].

Основные выводы этих исследований сводились к следующему.

При некоторых концентрациях имеет место максимум кривой $q_{кр} = f(N)$, причем значения $q_{кр, макс}$ могут быть существенно выше значений $q_{кр}$ для отдельных компонентов. С повышением давления точка $q_{кр}$ сдвигается в область больших



концентраций низкокипящего компонента.

Дальнейшие исследования кризиса кипения бинарных смесей сводились к изучению кипения новых смесей на поверхностях нагрева различных размеров и конфигураций как в условиях свободной конвекции [4-10], так и при направленном движении [11, 12]. В последнее время предприняты попытки получения обобщенных зависимостей по критическим тепловым потокам [8, 9]. Однако входящие в эти зависимости константы, характеризующие физические свойства смесей, делают их применение для практических расчетов неудобным (для большинства бинарных смесей физические свойства пока неизвестны).

В настоящей работе приводятся результаты исследования теплообмена при кипении смесей высококипящих и низкокипящих органических теплоносителей при свободной конвекции и в условиях вынужденного движения в трубах. В качестве высококипящих жидкостей были выбраны дифенил и моноизопропилдифенил, а низкокипящей — бензол.

В условиях свободной конвекции определялись значения $q_{кр}^{см}$ для смесей МИПД-бензол и дифенил-бензол, а также коэффициенты теплоотдачи к кипящим дифенило-бензольным смесям.

При вынужденном движении в трубах определялись значения $q_{кр}^{см}$ при поверхностном кипении смесей МИПД-бензол. Пределы изменения режимных параметров приведены в табл. 1 и 2.

На основании анализа экспериментального материала высказаны соображения, касающиеся механизма кипения бинарных смесей органических жидкостей. Предложена зависимость для определения значений $q_{кр}^{см}$ при кипении смесей на погруженных поверхностях, когда $t_{ж} = t_{н}$.

Табл. 1

Параметры и пределы изменения основных величин при определении значений $q_{кр}$

а. При кипении на погруженных поверхностях

Режим кипения	Жидкость	Весовая концентрация бензола в смеси [%]	Давление [бар]	Недогрев до температуры насыщения [°C]
Объемное кипение ($t_{ж} = t_{н}$)	Смесь дифенил-бензол	88,84,70,61,48	0 - 25	0
		34,29,15	0 - 25	0
		5	1,8-18	0
Поверхностное кипение ($t_{ж} < t_{н}$)	Смесь дифенил-бензол	89,82,65,61,42,29,	1,0	от 0 до 40-90
		24,19,10, 6		
		90,84,73,59,45, 28,19, 9, 6	7,86	от 0 до 80-136
Объемное кипение ($t_{ж} = t_{н}$)	Смесь МИПД-бензол	100,82,65,61,42, 28, 9, 6	17,65	от 0 до 120-180
		97,89,77,71,52 32,25	1,3-21	0
		21,12, 6	1,5-12	0
Поверхностное кипение ($t_{ж} < t_{н}$)	Смесь МИПД-бензол	3	2,4-8,6	0
		94	1,3-5,0	0
		98,89,76,69,50, 33,20,16,10, 4	1,27	от 4 до 51-96
Поверхностное кипение ($t_{ж} < t_{н}$)	Смесь МИПД-бензол	97,88,76,69,50, 33, 8, 2	7,85	от 0 до 79-113

б. При кипении в трубах

Режим кипения	Жидкость	Весовая концентрация бензола в смеси [%]	Давление [бар]	Скорость циркуляции (м/сек)	Недогрев до температуры насыщения [°C]
Поверхностное кипение ($t_{ж} < t_{н}$)	Смесь МИПД-бензол	6,12,20,28,33 46,77,90,91,100	2	4	от 3 до 50-100
		6,10,16,22,23,36, 46,77,90,100	2	8	от 3 до 50-100
		0,5,8,12,16,26, 36,46,77,90,100	2	12	от 3 до 50-100
		91	7,85	4,8,12	17-90

Табл. 2

Параметры и пределы изменения основных величин при определении значений коэффициентов теплоотдачи при кипении на погруженных поверхностях

Режим кипения	Жидкость	Давление бар	Весовая концентрация бензола в смеси [%]	Тепловой поток [кВт/м ²]
Объемное кипение ($t_{ж} = t_{н}$)	Смесь дифенил-бензол	1,08	92,85,80,76,50,21,2	16±210
		3,53	89,85,70,50,25,4	16±260
		8,00	89,84,70,50,19,5	16±440
		13,25	89,84,70,50,14,5	16±430
Поверхностное кипение ($t_{ж} < t_{н}$)	Смесь дифенил-бензол	3,53	92,87,69,49,16,3	72±290
		8,00	93,86,71,51,18,5	70±400
		13,25	92,86,70,51,19	136±400

Экспериментальные установки и методика исследования

Исследования кипения на погруженных поверхностях проведены на установке, подробно описанной в работе [13]. В качестве экспериментальных участков при определении $q_{кр}$ были использованы полированные пластины, проволоки и трубки различных размеров, изготовленные из нержавеющей и углеродистой стали. Длина экспериментальных участков составляла 100÷120 мм. Опыты по определению значений коэффициентов теплоотдачи проведены на тонкостенной трубке диаметром 5,0 мм, толщиной стенки 0,12 мм и длиной 100 мм из стали 1х18Н9Т.

Экспериментальный участок нагревался переменным током низкого напряжения. Переход от пузырькового кипения к пленочному определялся по резкому изменению сопротивлений экспериментального участка в месте возникновения кризиса. Изменение сопротивления наблюдалось по электронному осциллографу, включенному по мостовой схеме.

Во избежание застывания смеси, все части установки, соприкасающиеся с дифенило-бензольной смесью, имели внешний электрический обогрев.

Состав смеси устанавливался по ее плотности с помощью

тарировочной кривой. Пробы отбирались в начале и конце серии опытов, проводимой при одном давлении, а при кипении насыщенных смесей через интервал изменения давления примерно в 5 бар, поскольку максимальное изменение концентрации низкокипящего компонента за время серии опытов не превышало 0,5%.

До начала основной серии опытов жидкость кипятилась при атмосферном давлении до полного удаления растворенных в ней газов и стабилизации теплоотдающей поверхности примерно 1,5 часа.

В процессе исследования периодически производились контрольные замеры коэффициентов теплоотдачи и критических тепловых потоков. Воспроизводимость этих данных служила критерием стабильности условий работы /отсутствие отложений на поверхности трубки/.

Определение значений критических тепловых потоков при вынужденном движении в трубах производилось на установке, представляющей замкнутый контур с принудительной циркуляцией, в который последовательно включены центробежный насос, электронагреватель, расходомерное устройство, экспериментальный участок, компенсатор объема и сепаратор. Весь контур выполнен из труб нержавеющей стали диаметром 57/51 мм. Обогрев экспериментальной трубки производился переменным током. Устройство экспериментального участка и методика эксперимента подробно описаны в работе [14]. Все опыты проводились на трубах внутренним диаметром 10 мм и длиной 100 мм, изготовленных из стали 1х18Н9Т. Концентрация смеси определялась также по ее плотности; отбор проб производился на напорной линии циркуляционного насоса. Недогрев $\Delta t_{кр}$ определялся по отношению к температурам насыщения смесей, которые измерялись экспериментально. Погрешность измерений критического теплового потока не превышала 4,7% (кипение на проволоках диаметром 0,8 мм).

Проведенные эксперименты и их результаты

Основным опытам предшествовал цикл экспериментов, проведенных с целью выявления влияния материала и геометрии нагревателя на значения $q_{кр}^{сн}$, так как только экспериментальные данные, полученные в условиях, когда размер нагревателя мало сказывается на значениях $q_{кр}^{сн}$, могут сопоставляться между собой.

Эти опыты были проведены с чистым бензолом и смесью при весовой концентрации бензола $C_{бз} = 95\%$, когда давление изменялось от 1 до 20 бар.

Экспериментальные участки представляли из себя полированные нихромовые проволоки диаметром 0,8 мм; проволоки из углеродистой стали диаметром 1,2 мм; трубки из стали IX18H9T диаметром 3, 6, 8, 12 мм; пластинки из стали IX18H9T толщиной 1 мм и высотой 5 и 10 мм; пластинки из углеродистой стали толщиной 1 мм и высотой 10 мм.

Опыты были проведены при кипении, когда $t_{ж} = t_{н}$.

Как и следовало ожидать, материал не оказывает заметного влияния на значения $q_{кр}^{сн}$.

Опыты показали, что значения $q_{кр}^{сн}$, полученные на проволоке диаметром 0,8 мм, значительно выше, чем на поверхностях больших размеров.

Критические тепловые потоки, полученные на трубах диаметром 3 и 6 мм и пластинке высотой 5 мм дают близкие результаты, а значения $q_{кр}^{сн}$, полученные на трубке диаметром 12 мм и пластинках высотой 10 мм, располагаются значительно ниже остальных.

Таким образом, для чистого бензола и его смесей с дифенилом существует область (от 2 до 6 мм), в которой влияние поперечных размеров нагревателя на $q_{кр}^{сн}$ проявляется незначительно. Эти опыты подтвердили известный из работ других исследователей характер зависимости $q_{кр}^{сн}$ от высоты греющего элемента при кипении как однокомпонентных, так и многокомпонентных жидкостей.

В дальнейшем все опыты по определению значений $q_{кр}^{сн}$ в условиях естественной конвекции были проведены на пластинках, изготовленных из стали IX18H9T, высотой 5 мм, толщиной 1 мм и длиной 100 мм, поставленных на узкую грань.

При высоких температурах ($> 420^\circ\text{C}$) исследование не проводилось из-за наступавшего термического разложения дифенила. Значения $q_{кр}^{сн}$ при одних и тех же режимных параметрах, полученные на работавшей уже пластинке и новой, практически оставались одинаковыми. При кипении дифенило-бензольных смесей, когда $t_{ж} = t_{н}$, определялись зависимости $q_{кр}^{сн}$ от давления и состава смеси.

Было установлено, что общий характер зависимостей $q_{кр}^{сн}$ от давления мало отличается от аналогичных зависимостей для чистых компонентов, однако, абсолютные значения $q_{кр}^{сн}$ для смеси значительно выше, чем для ее составляющих. Обращает на себя внимание тот факт, что с уменьшением весовой концентрации бензола в смеси максимум функции $q_{кр}^{сн} = f(P)$ сдвигается в область меньших давлений.

Зависимости $q_{кр}^{сн}$ от состава имеют отчетливо выраженные максимумы в области низких и высоких концентраций бензола в смеси. Абсолютные значения $q_{кр}^{сн}$ значительно превышают значения $q_{кр}^{сн}$ для чистых компонентов. Максимум функции $q_{кр}^{сн} = f(N)$ расположенный в зоне малых концентраций бензола, сдвигается с увеличением давления в зону больших концентраций.

Зависимость $q_{кр}^{сн}$ от недогрева носит, как и для однокомпонентных жидкостей, в основном, линейный характер. При постоянных значениях недогрева $\Delta t_{нд}$ характер зависимости $q_{кр}^{сн}$ от состава сохраняется таким же, как и при $\Delta t_{нд} = 0$.

Результаты исследования при естественной конвекции для смесей МПД-бензол аналогичны результатам, установленным для смесей дифенил-бензол. Можно считать, что для бинарных смесей высококипящей и низкокипящей органической жидкости полученная нами качественная картина процесса является типичной.

Таким образом, всюду, где в процессе теплообмена при

кипении участвуют органические жидкости, в которых наряду с основной фракцией присутствуют низкокипящие (высококипящие) фракции, можно ожидать, что значения $q_{кр}^{см}$ будут выше по абсолютной величине, чем $q_{кр}$ для отдельных компонентов. Как уже отмечалось, изучение условий перехода от пузырькового кипения к пленочному проводилось нами как при кипении смесей в условиях естественной конвекции, так и при кипении при вынужденном движении в трубах.

Оказалось, что для всех концентраций увеличение скорости циркуляции приводит к увеличению $q_{кр}^{см}$ (для исследованной смеси МИПД-бензол), причем зависимость $q_{кр}^{см}$ от скорости имеет тот же характер, что и для отдельных компонентов.

При изменении давления от 1 до 8 бар для концентрации бензола в смеси $C_{мк} = 90\%$ влияние давления на значения $q_{кр}^{см}$ оказалось незначительным.

Таким образом, зависимости $q_{кр}^{см}$ от недогрева, скорости циркуляции и давления оказались качественно такими же, что и для однокомпонентных жидкостей.

Зависимости $q_{кр}^{см}$ от состава смеси носят такой же характер, что и при кипении на погруженных поверхностях. Следует, однако, отметить, что в области больших скоростей циркуляции относительное увеличение значений $q_{кр}^{см}$ заметно снижается. Экспериментальные данные при вынужденном движении смесей МИПД-бензол в трубах были сопоставлены с данными работы [11], полученными при кипении смесей МИПД-бензол в кольцевых каналах. Значения $q_{кр}^{см}$ при кипении смесей в трубах и кольцевых каналах оказались весьма близкими.

Опытные данные по коэффициентам теплоотдачи, полученные при кипении дифенило-бензольных смесей позволили установить зависимость α от состава смеси. Эта зависимость имеет отчетливо выраженный минимум. Абсолютные значения α для смесей значительно ниже значений α для отдельных компонентов. Так при кипении смесей, когда $t_{ж} = t_{н}$, значения α уменьшаются в 5 раз (при $P = 8,0$ бар, $C_{мк} = 50\%$), причем

при изменении концентрации от 20% до 80% коэффициенты теплоотдачи меняются незначительно. При $C_{мк} = 5\%$ значения α уменьшаются в 2 раза по сравнению с чистым дифенилом.

Резкое уменьшение коэффициента теплоотдачи происходит и при кипении смесей, недогретых до температуры насыщения. С уменьшением величины недогрева интенсивность теплоотдачи увеличивается. Однако это увеличение невелико, в то время как при кипении недогретых чистых компонентов оно проявляется заметно.

Влияние концентрации смеси при кипении недогретых жидкостей качественно остается таким же, что и в условиях, когда температура жидкости равна температуре насыщения. Следует отметить, что при малых концентрациях бензола (для температур больших 350°C) после 6-10 часов работы образовывался тонкий темносерый налет губчатого типа, трудно удаляемый с поверхности нагрева. Этот налет заметно снижал коэффициенты теплоотдачи, поэтому при этих концентрациях замеры проводились только на чистых новых трубках. Критерием надежности опытных данных во всех опытах служила повторяемость в начале и конце серии опытов, а также отсутствие налета на экспериментальной трубке. Практически каждая серия опытов при концентрациях 2; 3; 4 и 6% проводилась на новой трубке.

Обработка и анализ экспериментальных данных

Ранее в работе [7] была показана неприменимость обобщенных зависимостей, полученных для однокомпонентных жидкостей, для определения значений $q_{кр}$ при объемном кипении смеси вода-этанол.

Ввиду отсутствия опубликованных физических свойств большинства бинарных смесей, в том числе для смесей дифенила с бензолом и МИПД с бензолом, мы были лишены возможности сопоставления экспериментальных данных с расчетными, полученными по обобщенным зависимостям.

Для случая кипения недогретых смесей ($t_{ж} < t_{н}$) положение несколько облегчалось тем обстоятельством, что в расчетные

зависимости, полученные для однокомпонентных жидкостей, не входят ни вязкость, ни поверхностное натяжение, то есть константы, дающие наибольшую ошибку при определении их расчетным путем. Кроме того, изучаемые нами смеси органических жидкостей являются смесями гомологов и поэтому весьма близки по своим свойствам к идеальным растворам.

Физические константы $C_p, \rho', \rho'', r, T_c$ можно было довольно точно определить расчетным путем по методике, справедливой для идеальных растворов. К тому же, проведенные на кафедре Теоретических основ теплотехники МЭИ экспериментальные исследования по определению теплоемкости и плотности дифенил-бензолных смесей и наши экспериментальные исследования по температурам насыщения смесей показали близкое совпадение экспериментальных данных с соответствующими расчетными зависимостями.

Было проведено сопоставление экспериментальных значений $q_{кр}^{сн}$ при кипении недогретых смесей дифенил-бензол и МПД-бензол с величинами, рассчитанными по следующим известным формулам, оценивающим влияние недогрева $\Delta t_{нед}$ на $q_{кр}$: по формуле Кутателадзе

$$\frac{q_{кр}^{нед}}{q_{кр}^0} = 1 + 0,065 \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^{0,8} \frac{C_p \Delta t_{нед}}{r} \quad (1)$$

по формуле Кутателадзе-Буракова

$$\frac{q_{кр}^{нед}}{q_{кр}^0} = 1 + 0,11 \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^{0,5} \frac{C_p \Delta t_{нед}}{r} \quad (2)$$

по формуле Ивея-Мориса

$$\frac{q_{кр}^{нед}}{q_{кр}^0} = 1 + 0,102 \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^{0,75} \frac{C_p \Delta t_{нед}}{r} \quad (3)$$

и по формуле Стермана-Вилемаса

$$\frac{q_{кр}^{нед}}{q_{кр}^0} = 1 + 0,165 \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right) \frac{C_p \Delta t_{нед}}{r} K_s^{0,25} \quad (4)$$

где

$$K_s = \frac{r}{C_p T_c}$$

Значения критических тепловых потоков при отсутствии недогрева $q_{кр}^0$, использованные в расчетах, принимались по экспериментальным данным. Сопоставление показало, что ни одна из рассмотрен-

ных формул не обобщает все имеющиеся экспериментальные данные с достаточной точностью. Этого, конечно, и следовало ожидать, так как формулы не отражают специфики процесса теплоотдачи к смесям. Для прикидочных расчетов предпочтение следует отдать формулам (1), (3) и (4), несколько лучше оценивающих влияние $\Delta t_{нед}$ на $q_{кр}$.

В основе процессов кипения смесей, приводящих к сложным зависимостям значений критических тепловых потоков и коэффициентов теплоотдачи от состава, лежат особенности состояния жидкой смеси непосредственно у стенки. Эти особенности могут проявляться в виде изменения гидродинамической структуры двухфазного потока вблизи стенки, изменения наименьшего радиуса кривизны зародыша пара и т.д. В основе этих особенностей лежат явления тепло- и массопереноса в пристенном слое. Специфической чертой кипения бинарных смесей органических теплоносителей является существование в пристенном микрослое градиента концентраций компонентов. Это обусловлено более интенсивным испарением низкокипящего компонента /НК/ внутри парового пузыря. Сам этот факт уже должен непосредственно отразиться на процессе теплоотдачи. Так как температура насыщения смеси зависит от ее состава, температура насыщения жидкости в прилегающем к поверхности слое оказывается всегда выше, чем в ядре потока. Подтекающая к поверхности жидкость подогревается здесь до температуры, превышающей температуру, которая имела бы место, если бы концентрация в микрослое была такой же, что и в потоке. На это затрачивается дополнительное количество теплоты Δq . Ввиду того, что разность концентраций в микрослое и потоке тем выше, чем больше тепловой поток, Δq возрастает с увеличением теплового потока. Увеличение количества теплоты, передаваемой одному и тому же объему жидкости, приводит к возрастанию тепловой энергии, выносимой молями парожидкостной среды (вследствие возрастания разницы между энтальпией жидкости в пограничном слое и ядре потока). Этот эффект проявляется тем сильнее, чем больше разность температур между жидкостью непосредственно у теплоотдающей поверхности и в ядре потока.

Последняя существенно зависит как от разности равновесных концентраций НК в паровой и жидкостной фазах ($\Delta N = N'' - N'$), так и от крутизны линии насыщения. Чем выше ΔN , тем при той же интенсивности процессов массообмена установится более высокий градиент концентраций в пристенном микрослое. В то же время одно и то же значение ΔN окажет тем большее влияние на количество перенесенного молями смеси тепла, чем больше крутизна линии насыщения, т.е. чем более резко влияние концентрации на T_n .

Для дифенило-бензольных смесей и смесей МПД-бензол ΔN сначала, с увеличением концентрации НК, растет, а затем, достигнув некоторого наибольшего значения, начинает падать. Крутизна кривой насыщения жидкости непрерывно падает. Поэтому первоначально, когда ΔN растет, а T_n сильно меняется с увеличением концентрации НК, критический тепловой поток также увеличивается. В дальнейшем, когда и ΔN , и крутизна линии насыщения уменьшаются, $q_{кр}^{см}$ падает, хотя по абсолютной величине остается более высоким, чем для чистой жидкости (наличие разности температур насыщения в прилегающей к стенке пленке и ядре жидкости продолжает оказывать положительное влияние на количество вынесенного тепла, однако это влияние слабее, чем при более низких концентрациях НК). Таким образом, первый максимум кривой $q_{кр}^{см} = f(N')$ объясняется сравнительно просто.

Для повышенных давлений изменение T_n в зависимости от N' при низких концентрациях НК происходит менее резко, а наибольшие значения ΔN достигаются при большем содержании НК в смеси. Поэтому точка, определяющая наибольшее значение $q_{кр}^{см}$, сдвигается в сторону более высоких концентраций.

Аналогичные рассуждения позволяют объяснить также второй максимум на кривой $q_{кр}^{см} = f(N')$. Первоначально с увеличением концентрации НК в смеси высококипящий компонент все в большем количестве собирается у теплоотдающей поверхности. Энтальпия молей, отрывающихся от поверхности теплообмена, при этом возрастает. В дальнейшем с возрастанием концентрации НК в смеси разница между $N''_{вк}$ в пленке и ядре потока уменьшается, в то время как температура ядра потока все более возрастает, и

поэтому $q_{кр}^{см}$ начинает уменьшаться. При кипении недогретых до температуры насыщения смесей требуется дополнительное тепло Δq , которое расходуется на нагрев жидкости до температуры насыщения, соответствующей концентрации смеси в микрослое. Максимальный градиент концентраций НК-компонента тем выше, чем больше разность равновесных концентраций НК в паре и жидкости, и следовательно можно предполагать, что $q_{кр}^{см}$ имеет наибольшее значение в области таких концентраций НК-компонента N' , при которых ΔN близко к максимальной величине.

При направленном движении среды можно ожидать относительно меньшего изменения $q_{кр}^{см}$ по сравнению с $q_{кр}$ для отдельных компонентов, чем в условиях теплопередачи на погруженных поверхностях, так как мольный обмен, вызываемый перемещением потока, способствует выравниванию концентраций в направлении, нормальном к поверхности теплообмена. Очевидно, что при больших значениях скорости потока это влияние будет проявляться сильнее.

Для смесей жидкостей, температуры кипения которых заметно различаются между собой, $\Delta N_{насс}$ велико и изменение $q_{кр}^{см}$ для них, в зависимости от состава, становится большим. Так для смесей дифенил-бензол и МПД-бензол, компоненты которых существенно различаются по значениям температур кипения, увеличение $q_{кр}^{см}$ достигает соответственно 90% и 100%. Для смесей ацетон-толуол, где разность температур кипения отдельных компонентов равна 54° , наибольшая величина $q_{кр}^{см}$ отличается от значений для чистых компонентов на 40%; для смесей Р- и М-терфенилов и бензола с толуолом (температуры насыщения отдельных компонентов смеси отличаются соответственно на 10° и 30°) значения $q_{кр}^{см}$ практически не превышали значения $q_{кр}$ для чистых компонентов.

Таким образом, весь имеющийся экспериментальный материал подтверждает предполагаемый механизм процесса кипения бинарных смесей органических жидкостей. Можно ожидать, что бинарные (многокомпонентные) смеси будут иметь близкие значения $q_{кр}^{см}$ и $q_{кр}$ для отдельных компонентов только в том случае, если температуры насыщения отдельных составляющих будут мало отли-

чатся между собой.

Что же касается причин резкого уменьшения коэффициентов теплоотдачи при кипении смесей дифенил-бензол, то из рассмотрения механизма кипения смесей это может быть объяснено достаточно отчетливо.

При добавлении в чистую высококипящую жидкость низкокипящего компонента температура насыщения смеси уменьшается значительно сильнее, чем температура насыщения прилегающего к теплоотдающей поверхности слоя, так как наличие градиента концентраций приводит к тому, что у стенки концентрация ВК выше, чем в ядре потока. Поэтому для кипения, когда $t_{ж} = t_{н}$, при той же интенсивности обмена численное значение α уменьшается, так как общий температурный перепад возрастает за счет уменьшения температуры насыщения ядра и потока. При добавлении в НК высококипящего компонента по тем же причинам численное значение α уменьшается за счет роста общего температурного перепада, поскольку температура насыщения ядра потока мало меняется, а температура стенки существенно растет. Таким образом, в смесях высококипящих и низкокипящих органических жидкостей значения коэффициентов теплоотдачи падают и близки, как показывает эксперимент, к значениям α для конвективного теплообмена.

Экспериментальные данные по значениям $q_{кр}^{см}$ при кипении бинарных смесей органических жидкостей на погруженных поверхностях, когда $t_{ж} = t_{н}$, были обработаны в системе

$$q_{кр}^{см} = [(1-N)q_{кр}^{БК} + Nq_{кр}^{НК}] \varphi\left(\Delta N, \frac{T_{н}^{НК}}{T_{н}^{см} - T_{н}^{НК}}\right) \quad (5)$$

При построении этой системы мы исходили из того, что в соответствии с рассмотренным механизмом процесса, увеличение $q_{кр}$ для смесей (по сравнению со средним значениям этой величины определенным по абсолютным значениям $q_{кр}$ для чистых компонентов) должно в первом приближении определяться разностью равновесных мольных концентраций НК-компонента в паре и жидкости ΔN и отношением $\frac{T_{н}^{НК}}{T_{н}^{см} - T_{н}^{НК}}$.

В выражение (5) не входят величины определяющие физические свойства смесей, что удобно для практических расчетов (для

большинства бинарных смесей физические свойства пока неизвестны). В системе (5) обработаны все экспериментальные данные, полученные нами на смесях дифенила с бензолом и МИПД с бензолом, данные Карне [12], полученные на смесях ацетона с толуолом, данные Павлищева [6], полученные на смеси бензола с толуолом и данные Корычанека Я., полученные на смеси М-терфенила с Р-терфенилом. В результате установлена зависимость

$$q_{кр}^{см} = [(1-N)q_{кр}^{БК} + Nq_{кр}^{НК}] \left(1 + 2.1\Delta N^{1.8} + 0.016\Delta N \frac{T_{н}^{НК}}{T_{н}^{см} - T_{н}^{НК}}\right) \quad (6)$$

справедливая в диапазоне изменения давлений от 1 до 8 ата.

Здесь значения $q_{кр}^{НК}$, $q_{кр}^{БК}$ и $T_{н}^{НК}$, а также $T_{н}^{см}$ для смесей дифенила с бензолом и МИПД с бензолом принимались по экспериментальным данным. Величины ΔN (а также $T_{н}^{см}$ для других смесей) определялись расчетным путем.

Формула (6) обобщает все экспериментальные данные, в основном, с точностью $\pm 13\%$.

Основные результаты и выводы

1. Проведено экспериментальное исследование критических тепловых потоков при объемном и поверхностном кипении смесей дифенил-бензол и МИПД-бензол на погруженных поверхностях различной геометрии в широком диапазоне изменения давления и температуры во всем интервале изменения концентраций. Было обнаружено влияние размеров нагревателя на значения $q_{кр}^{см}$. Зависимость $q_{кр}^{см}$ от состава имеет отчетливо выраженные максимумы в области низких и высоких концентраций бензола в смеси. Влияние давления на значения $q_{кр}^{см}$ оказалось существенным.
2. Проведено экспериментальное исследование критических тепловых потоков при поверхностном кипении смесей моноизопропилдифенил-бензол в трубах. Опыты проводились при скоростях циркуляции 4; 8 и 12 м/сек и давлении 2 бар. Влияние давления на значения $q_{кр}^{см}$, определенное при концентрации смеси равной 90%, оказалось незначительным. Установленные зависимости $q_{кр}^{см}$ от состава качественно носят такой же характер, как и

при кипении смесей на погруженных поверхностях. С ростом скорости циркуляции относительное увеличение значений $q_{кр}^{см}$ снижается.

3. Проведено экспериментальное исследование теплообмена при объемном и поверхностном кипении дифенило-бензольных смесей на погруженных поверхностях при различных давлениях во всем диапазоне изменения концентраций. Установлена зависимость коэффициента теплоотдачи α от состава смеси. Эта зависимость имеет отчетливо выраженный минимум. Коэффициенты теплоотдачи для смесей уменьшаются в несколько раз по сравнению с чистыми компонентами.
4. Установлено, что лишь при поверхностном кипении смесей на погруженных поверхностях для прикидочных расчетов можно пользоваться формулами Стермана-Вилемаса, Кутателадзе и Ивеля-Мориса.
5. На основе полученных экспериментальных данных, а также имеющихся данных по объемному кипению на погруженных поверхностях смесей М-Р-терфенилов, смесей ацетон-толуол и бензол-толуол установлена зависимость

$$q_{кр}^{см} = [(1-N)q_{кр}^{эк} + Nq_{кр}^{нк}] \left(1 + 2,1 \Delta N^{1,8} + 0,016 \Delta N \frac{T_{нк} - T_{нсм}}{T_{нсм} - T_{н}} \right)$$

Предложенная зависимость обобщает все экспериментальные данные, в основном, с точностью $\pm 13\%$.

Основное содержание диссертации опубликовано в статьях:

1. Абрамов А.И. (в соавторстве со Стерманом Л.С., Михайловым В.И., Вилемасом Ю.В. и Логиновым А.А.) Определение критических тепловых потоков при кипении в трубах высокипящих органических теплоносителей. Статья в сборнике "Исследования по применению органических теплоносителей-замедлителей в ядерных реакторах", Атомиздат, 1964.
2. Абрамов А.И. (в соавторстве со Стерманом Л.С.) Исследование теплоотдачи и критических тепловых потоков при кипении дифенило-бензольных смесей, Теплоэнергетика № 9, 1967.

Материал диссертации докладывался на УП Сибирском теплофизическом семинаре 1965 г., на научно-технических конференциях МЭИ в 1965 и 1967 годах, на международной конференции в Чикаго в 1966 г.; доклады опубликованы:

1. Абрамов А.И. (в соавторстве со Стерманом Л.С. и Ницне К.) Исследование теплоотдачи при кипении дифенило-бензольных смесей на погруженных поверхностях. Статья в сборнике "Доклады научно-технической конференции МЭИ" Москва, 1965.
2. Abramov A.I. (with Sterman L.S., Vilemas J.), On heat transfer and critical heat flux in organic coolants and their mixtures boiling. Proceedings of the Third International Heat Transfer Conference, 1966, Chicago, vol. IV, paper 141
3. Абрамов А.И. (в соавторстве со Стерманом Л.С.) Критические тепловые потоки при кипении смесей моноизопропилдифенил (МИПД)-бензол в трубах и большом объеме. Статья в сборнике "Доклады научно-технической конференции МЭИ" Москва, 1967.

Литература

1. Q.S. Vos and S.I.D. Van Stralen. Chemical Engineering Science, 1956, vol. 5, pp 50-56.
2. В.Г.Фастовский и Р.И.Артём. Теплоэнергетика, 1958, № 8.
3. S.I.D. Van Stralen. British Chemical Engineering, January, 1959, February, 1959, December, 1961, February, 1961.
4. Г.И. Бобрович, С.С.Кутателадзе, И.И.Гогонин, В.Н.Москвичева. ПМТФ № 4, 1962.
5. Хене и Губер. Теплоэнергетика № 3, 1963 г. Труды Американского общества инженеров-механиков.
6. М.В.Павлищев. Кандидатская диссертация, 1963 г., Киевский политехнический институт.
7. С.С.Кутателадзе, А.И.Леонтьев, В.Н.Москвичева, Г.И.Бобрович, И.И.Гогонин, И.Г.Маленков, Н.А.Мамонтова, Л.С.Штоколов, А.Г.Кирдяшкин. Труды ЦКТИ, вып. № 58, Ленинград, 1965 г.

8. Ш.А.Гайдаров. Автореферат кандидатской диссертации, Казань, 1957г.
9. Г.И.Бобрович. Автореферат кандидатской диссертации, Новосибирск, 1965
10. А.Н.Григорьев, И.Х.Хайруллин, А.Г.Усманов. Сб. "Тепло- и массоперенос" том 3, Минск, 1965г.
11. К.В.Набойченко, А.А.Кирютин, Б.С.Грибов. Теплоэнергетика, № 11, 1965г.
12. Carne. *The Canadian Journal of Chemical Engng*, 41, № 6, 1966.
13. Л.С.Стерман, А.И.Абрамов. Теплоэнергетика, 9, 1967г.
14. Л.С.Стерман, А.И.Абрамов, В.Д.Михайлов, Ю.Вилемас, А.А.Логинов, Сб. "Исследования по применению органических теплоносителей-замедлителей в энергетических реакторах", Атомиздат, 1964 г.

Обозначения:

$q_{кр}^{см}, q_{кр}^{вк}, q_{кр}^{нк}$	-соответственно критические тепловые потоки смеси, высококипящего и низкокипящего компонентов;
P	- давление;
$t_{ж}, t_n$	- соответственно температура жидкости и температура насыщения;
α	- коэффициент теплоотдачи;
$C'_{нк}$	- весовая концентрация жидкой фазы низкокипящего компонента в смеси;
N	- мольная концентрация низкокипящего компонента в смеси;
$\Delta N = N'' - N'$	- разность мольных концентраций низкокипящего компонента в паровой и жидкой фазах;
$T_n^{нк}, T_n^{см}$	- соответственно температуры насыщения низкокипящего компонента и бинарной смеси в °К.