

6
А-53

На правах рукописи.

АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛОРУССКОЙ ССР
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА

Майоров Виталий Александрович

СВОЙСТВА УСТОЙЧИВЫХ СИСТЕМ
ДВУХФАЗНОГО ПОРИСТОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Специальность : 01.04.14 - теплофизика.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук.

Минск, 1973 г.

f

На правах рукописи.

АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛОРУССКОЙ ССР
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА

Майоров Виталий Александрович

СВОЙСТВА УСТОЙЧИВЫХ СИСТЕМ
ДВУХФАЗНОГО ПОРИСТОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Специальность : 01.04.14 - теплофизика.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук.

Минск, 1973 г.

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени
Институте тепло- и массообмена АН БССР.

Научный руководитель - кандидат технических наук
старший научный сотрудник

Л.Л.Васильев

Официальные оппоненты- доктор технических наук
профессор

Г.Д.Рабинович

кандидат технических наук
старший научный сотрудник

В.М.Ерошенко

Ведущее предприятие - указано в диссертации

Автореферат разослан " 6 " сентября 1973 года.

Защита диссертации состоится " 10 " октября 1973 г
в 14 часов на заседании Совета по присуждению ученых сте-
пеней Института тепло- и массообмена АН БССР.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института.

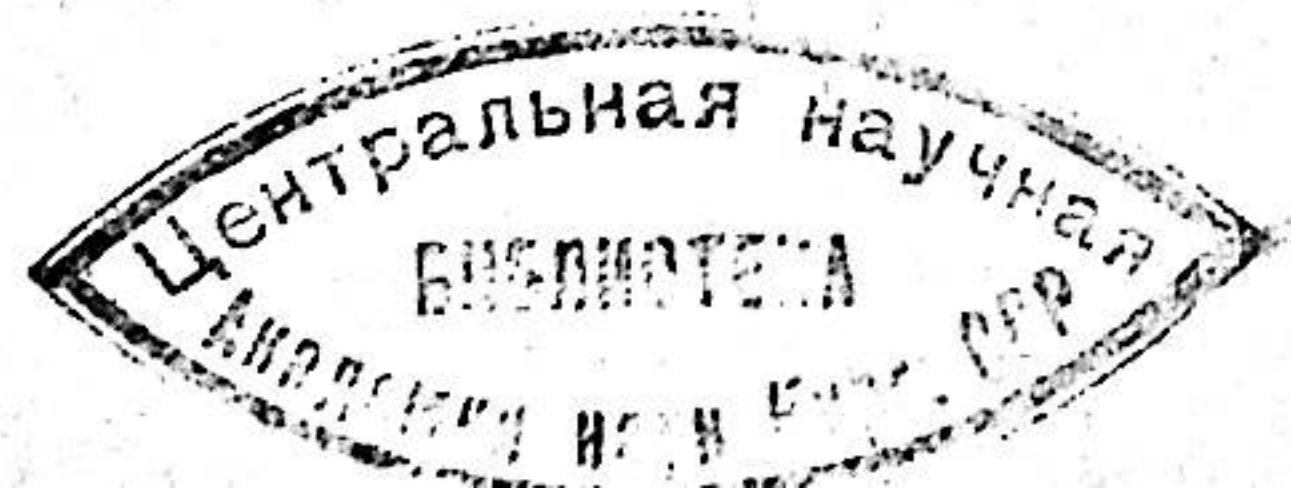
Отзывы на диссертационную работу и автореферат в двух эк-
земплярах просим направлять по адресу:

220728, г.Минск, ГСП, Подлесная 15,
Институт тепло- и массообмена АН БССР.

Ученому секретарю Совета.

Ученый секретарь
Совета

(канд. физ.-мат. наук
Т.Н.Абраменко)



Одним из наиболее перспективных методов тепловой защиты является охлаждение жидкостью, испытывающей фазовое превращение внутри пористой стенки. Указанная система по сравнению с абляцией, охлаждением с помощью жидкостной или газовой пленки, а также газовым пористым охлаждением обладает такими существенными преимуществами, как

а) высокая теплопоглощающая способность охладителя, обусловленная испарением жидкости и перегревом образующегося пара;

б) отсутствие ограничений по величине аэродинамических касательных напряжений на внешней поверхности и по плотности подводящего теплового потока, который может быть и конвективным, и лучистым, и комбинацией обоих названных;

в) вытекающий перегретый пар так изменяет распределение температуры во внешнем пограничном слое, что конвективный тепловой поток к поверхности значительно снижается;

г) повышение в допустимых пределах температуры внешней поверхности способствует как дальнейшему уменьшению конвективного теплового потока, так и рассеиванию некоторой его части в окружающее пространство в виде теплового излучения;

д) применение охладителя с высокой поглощательной способностью паров по отношению к тепловому излучению (например, воды) приводит к существенному ослаблению подводящего к внешней поверхности лучистого теплового потока.

Несмотря на столь очевидные преимущества, двухфазное пористое охлаждение до сих пор остается совершенно неизученным. Причина кроется не в отсутствии попыток его исследования, а в том, что в первых же экспериментах была обнаружена неустойчивость процесса. Такой результат сдерживает дальнейшее развитие исследований.

Из всех теплотехнических устройств именно установки с фазовым превращением рабочего тела наиболее склонны к неустойчивой работе, когда малое возмущение параметров процесса вызывает пе-

реход системы в новое состояние, значительно отличающееся от первоначального. Широко известны также типы аperiodической неустойчивости, как кризис кипения и внезапное, большой величины, изменение расхода в обогреваемых каналах проточных котлов.

В неустойчивой системе двухфазного пористого охлаждения невозможно стабилизировать область кипения внутри пористой структуры. Небольшое увеличение тепловой нагрузки или уменьшение перепада давления приводят к замене потока испаряющейся на внешней поверхности пластины жидкости однофазным потоком пара. Расход охладителя при этом уменьшается, что сопровождается прогаром стенки в случае высоких тепловых нагрузок.

Предлагаемая работа посвящена выяснению причин неустойчивости двухфазного пористого охлаждения и определению методов ее устранения. Результаты исследования изложены в четырех главах.

В первой главе обобщаются имеющиеся в литературе данные по отдельным проблемам изучаемого явления.

Исследование устойчивости любого процесса само по себе сопряжено со значительными трудностями. Сложность поставленной задачи усугубляется еще более тем, что двухфазное пористое охлаждение включает следующие малоизученные вопросы:

- а) определение теплофизических и гидравлических характеристик пористого металлокерамического материала;
- б) гидродинамика и теплообмен при фильтрации однофазного охладителя;
- в) закономерности кипения жидкости в пористой структуре.

Среди двухфазных систем, состоящих из пористого металлокерамического материала, заполненного жидкостью, более подробно исследованы физические свойства таких сред, в которых запол-

нителем является газ. Теплопроводность подобной системы с произвольной концентрацией фаз удовлетворительно вычисляется с помощью соотношения В.В. Скорюхова. В дальнейшем будет показано, что как раз эффективная теплопроводность области твердое тело-пар оказывает основное влияние на устойчивость процесса двухфазного охлаждения.

Движение жидкости в пористой среде описывается модифицированным уравнением Дарси /2/, учитывающим как сопротивление трения /первое слагаемое в правой части/, так и инерционное сопротивление /второе слагаемое/. Коэффициенты сопротивления, α - вязкостный и β - инерционный, характеризует пористую структуру и не зависят ни от вида фильтрующей жидкости, ни от температуры материала. Отношение этих коэффициентов $\frac{\beta}{\alpha}$ имеет размерность длины и используется в качестве характерного размера пористой среды, который вводится в критерий Рейнольдса потока жидкости в пористой структуре и в критерий объемного теплообмена /46/. Современная технология позволяет получать металлокерамические материалы с требуемыми гидравлическими характеристиками.

Экспериментальные данные по интенсивности внутрипористого конвективного теплообмена при фильтрации однофазной жидкости отличается своей немногочисленностью и значительным разбросом. Однако они всё же позволяют судить о порядке величины коэффициента объемного теплообмена. Критериальное уравнение внутрипористого теплообмена /45/ является наиболее удовлетворительной аппроксимацией результатов, полученных в вязкостном и переходном режимах течения для различных видов охладителя.

Можно сказать, что полностью отсутствуют данные по закономерностям теплообмена и сопротивлениям при кипении в пористых средах применительно к двухфазному пористому охлаждению. Характерной чертой единичных устойчивых систем является многослойность пористой стенки. Однако следует отметить, что подобная конструкция является скорее экспериментальной находкой, чем строго обоснованной теоретически, судя по истории ее развития и по структурным характеристикам отдельных слоев.

Малая протяженность области кипения в пористой матрице — самая важная особенность устойчивого двухфазного пористого охлаждения, которую удалось выявить в этих установках.

Некоторые представления о кипении жидкости в пористых средах дают эксперименты с тепловыми трубками. Отмечается, что устойчивое кипение в пористой матрице осуществляется при меньшей разности температур материала и жидкости, чем кипение в большом объеме.

Во второй главе дан вывод условия устойчивости равновесного процесса двухфазного пористого охлаждения.

Недостаток сведений об основных закономерностях устойчивого двухфазного охлаждения приводит к использованию модели, упрощающей действительный процесс, но сохраняющей его качественные особенности.

Предлагаемая равновесная модель стационарного двухфазного пористого охлаждения изображена на рис. 1. Однородная плоская пористая пластина, длина и ширина которой велики по сравнению с толщиной δ , подвергается воздействию постоянного внешнего теплового потока плотностью q . Для охлаждения используется жидкость с начальной температурой T_∞ . Охладитель продавливается через стенку под действием постоянного давления подачи P_0 в окружающую среду, где поддерживается заданное давление P_1 . По мере движения внутри пористой среды жидкость поглощает тепло и ее температура возрастает. При этом существует локальное равенство температур охладителя и материала стенки — тепловое равновесие. Одновременно с ростом температуры падает давление в жидкости. Как только давление и температура жидкости достигают значений, соответствующих состоянию насыщения, происходит ее фазовое превращение. Кипение заключено в тонкой, по сравнению с толщиной пластины, области на расстоянии L от внутренней поверхности стенки. Разность давлений на поверхности раздела фаз, обусловленная влиянием эффектов поверхностного натяжения, принимается малой по сравнению с перепадом давления на пластине.

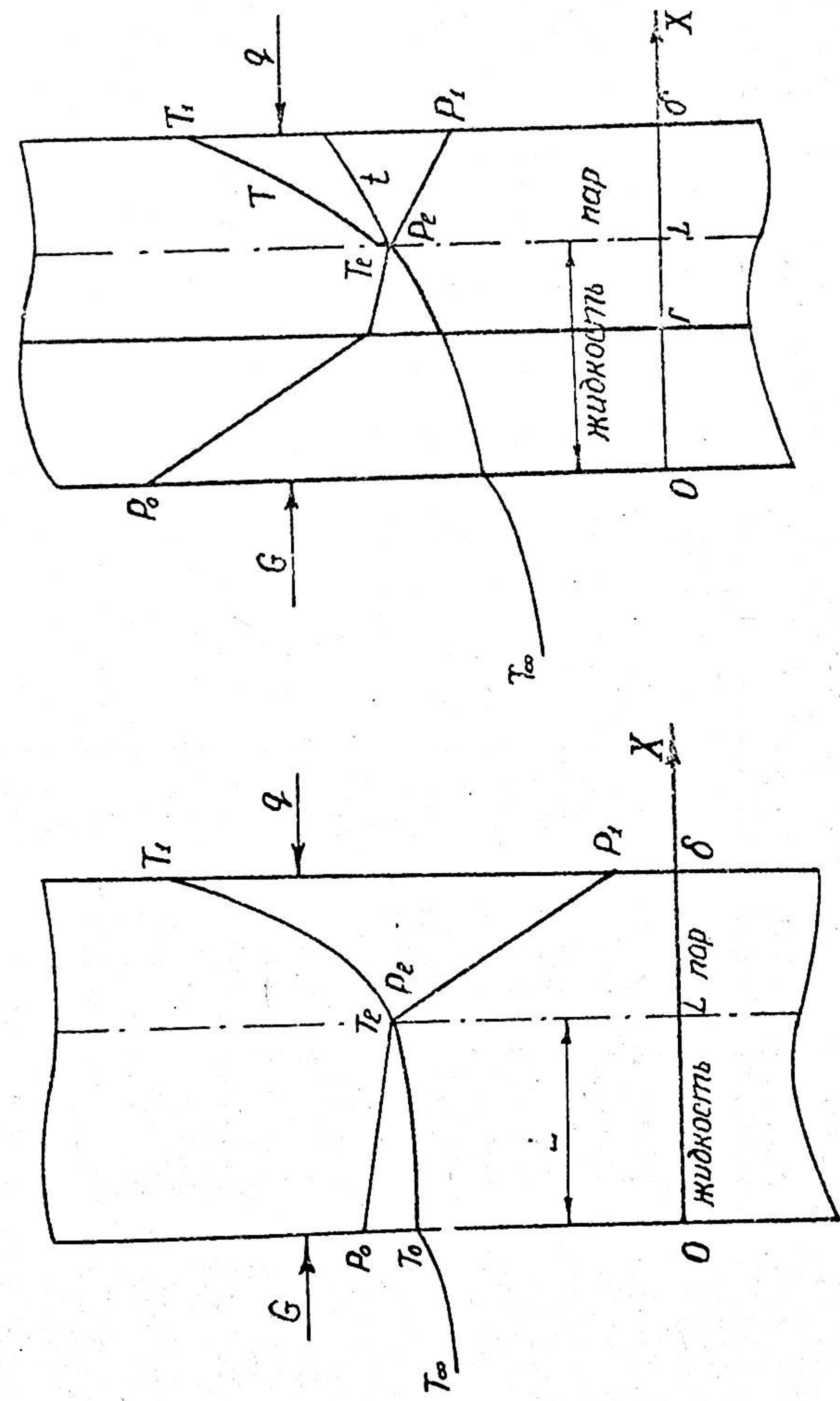


Рис. 1. Равновесная модель двухфазного пористого охлаждения однородной пластины.

Рис. 2. Неравновесная модель двухфазного пористого охлаждения двухслойной пластины.

Образовавшийся пар поглощает тепло на участке от зоны кипения до внешней поверхности и в перегретом состоянии вытекает в окружающее пространство.

С учетом принятых допущений, процесс двухфазного пористого охлаждения однородной пластины описывается системой дифференциальных уравнений, которая включает в себя :

уравнение неразрывности потока /1/ ;

модифицированное уравнение Дарси - уравнение движения жидкости в пористой среде /2/ ;

и уравнения энергии ;

для жидкости /3/ ;

для области жидкость - пористая стенка /4/ ;

для области пар-пористая стенка /5/;

Граничные условия для системы уравнений /1/ - /5/ отражают следующие особенности процесса :

задается начальная температура жидкости /6/ ;

на границах областей выполняются условия сопряжения решений , причем на поверхности раздела фаз тепловой поток уменьшается на величину, необходимую для испарения всего потока охлаждающего /7,8/ ;

на внешней поверхности стенки определены плотность теплового потока, давление окружающей среды и максимальная температура надежной работы материала стенки /9/ ;

условие термодинамического равновесия фазового превращения /10/ используется для определения неизвестного положения области раздела фаз и таким образом замыкает задачу.

Определяющими параметрами для создания системы охлаждения являются : плотность внешнего теплового потока, давление окру-

$$|1| \quad \frac{dG}{dx} = 0$$

$$|2| \quad -\frac{dP}{dx} = \frac{\alpha \mu}{\rho} G + \frac{\beta}{\rho} G_2$$

$$|3| \quad \lambda' \frac{d^2 t_0}{dx^2} - G c' \frac{dt_0}{dx} = 0 \quad -\infty < x < 0$$

$$|4| \quad \lambda_1 \frac{d^2 t_1}{dx^2} - G c' \frac{dt_1}{dx} = 0 \quad 0 < x < L$$

$$|5| \quad \lambda_2 \frac{d^2 t_2}{dx^2} - G c'' \frac{dt_2}{dx} = 0 \quad L < x < \delta$$

$$|6| \quad t_0 = T_\infty \quad x = -\infty$$

$$|7| \quad t_0 = t_1 = T_0 \quad \lambda' \frac{dt_0}{dx} = \lambda_1 \frac{dt_1}{dx} \quad x = 0$$

$$|8| \quad t_1 = t_2 = T_\ell \quad \lambda_2 \frac{dt_2}{dx} - \lambda_1 \frac{dt_1}{dx} = G_2 \quad x = L$$

$$|9| \quad q = \lambda_2 \frac{dt_2}{dx} ; \quad P = P_1 \quad T_1 \leq T^{**} \quad x = \delta$$

$$|10| \quad P_\ell = P_H(T_\ell) \quad x = L$$

жащей среды, а также вид охладителя и его начальная температура.

Цель исследования - на основе данной модели и ее дальнейшего развития разработать метод определения таких структурных и теплофизических характеристик пластины, чтобы при минимальном расходе охладителя и возможных, заданной величины, колебаниях определяющих параметров температура внешней поверхности не превышала предельно допустимого значения.

Анализ выражений /1/ - /10/ показывает, что модель двухфазного пористого охлаждения описывается нелинейной замкнутой системой дифференциальных уравнений. Физические свойства охладителя, входящие в уравнения энергии и движения, зависят от температуры и давления и скачкообразно изменяются в области фазового превращения; положение которой, в свою очередь, определяется из решения этих уравнений с учетом термодинамической равновесности фазового превращения. Неизвестной является и величина расхода охладителя.

Нами предлагается следующий метод решения этой задачи: считая положение поверхности раздела фаз известным, из уравнения движения и уравнений энергии находим давление и температуру в предполагаемой области фазового перехода. Полученные значения изображаются точкой на фазовой диаграмме охладителя. Совокупность таких точек, соответствующих всем положениям поверхности фазового превращения внутри пористой стенки, представляет собой непрерывную кривую. Из взаимного поведения полученной кривой и кривой насыщения выводится заключение о положении области фазового превращения и, что более важно, об устойчивости рассматриваемой системы.

Результаты имеют аналитическую форму, если физические свойства каждой фазы охладителя и материала стенки принять постоянными. В качестве определяющего для выбора физических свойств

жидкости и пара в системе с фазовым превращением наиболее подходит состояние на кривой насыщения при давлении, равном давлению окружающей среды.

В этом случае система /1/ - /10/ допускает разделение тепловой и гидродинамической составляющих процесса. Всею своей специфике двухфазное пористое охлаждение обязано гидродинамике охладителя с фазовым превращением внутри пористой стенки. Поскольку этот вопрос до настоящего времени совершенно не исследован, отметим его некоторые, наиболее важные, особенности.

В результате интегрирования уравнения неразрывности /1/ и уравнения движения /2/ по общим - жидкостному и паровому - участкам течения охладителя получаем после приведения к безразмерному виду:

уравнение движения /11/;

решение уравнения движения /12/;

перепад давления на жидкостном участке /13/.

В перечисленных соотношениях использована безразмерная координата поверхности фазового перехода ξ и следующие обозначения:

вспомогательные комплексы /14/;

безразмерный расход охладителя, как отношение действительного расхода G к расходу жидкого охладителя в режиме Дарси G_1 /15/;

критерий Рейнольдса, являющийся мерой отношения инерционных сил сопротивления к вязкостным при движении охладителя в пористой среде /16/.

Из этих выражений следует, что расход выбранного охладителя зависит от положения поверхности фазового превращения, физических свойств обеих фаз охладителя /определяемых давлением внешней среды/ и от числа Рейнольдса потока. В дальнейшем все количест-

111) $1 = gm + g^2 n Re$

112) $g = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4 Re \frac{n}{m^2}}}{2 Re \frac{n}{m}}$

113) $\frac{P_0 - P_e}{P_0 - P_i} = gl + g^2 l Re$

114) $l = \frac{L}{\delta}, m = [l + \frac{V''}{V'}(1-l)]; n = [l + \frac{\rho'}{\rho''}(1-l)]$

115) $g = \frac{G}{G_1}; G_1 = \frac{P_0 - P_i}{\delta V' \alpha}$

116) $Re = \frac{G_1 (\beta/\alpha)}{\mu'} = \frac{P_0 - P_i}{\delta V' \alpha} \frac{(\beta/\alpha)}{\mu'}$

117) $\theta_0 = \frac{t_0 - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \exp(k_0 x); \theta_1 = \frac{t_1 - T_0}{T_l - T_0} = \frac{\exp(k_1 x) - 1}{\exp(k_1 l) - 1}$

$\theta_2 = \frac{t_2 - T_l}{T_1 - T_\infty} = \frac{\exp[k_2(x-l)] - 1}{\exp[k_2(1-l)] - 1}; x = \frac{x}{\delta}$

118) $k_0 = \frac{G \delta c'}{\lambda'}; k_1 = \frac{G \delta c'}{\lambda_1}; k_2 = \frac{G \delta c''}{\lambda_2}$

119) $T_l = T_\infty + \frac{q \exp[k_2(l-1)] - G_2}{G c'}$

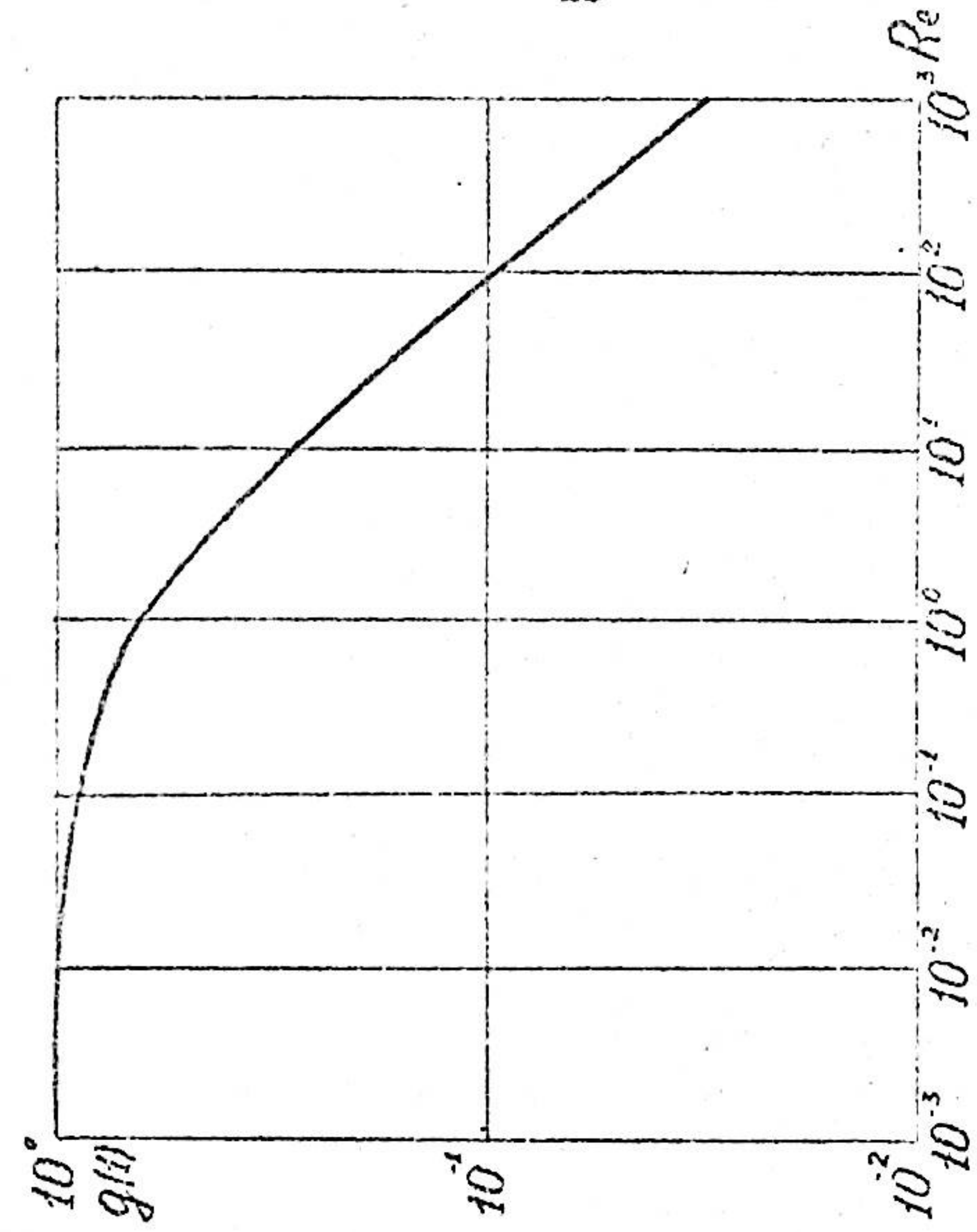


Рис. 4. Зависимость безразмерного массового расхода жидкого охлаждающего агента от числа Рейнольдса.

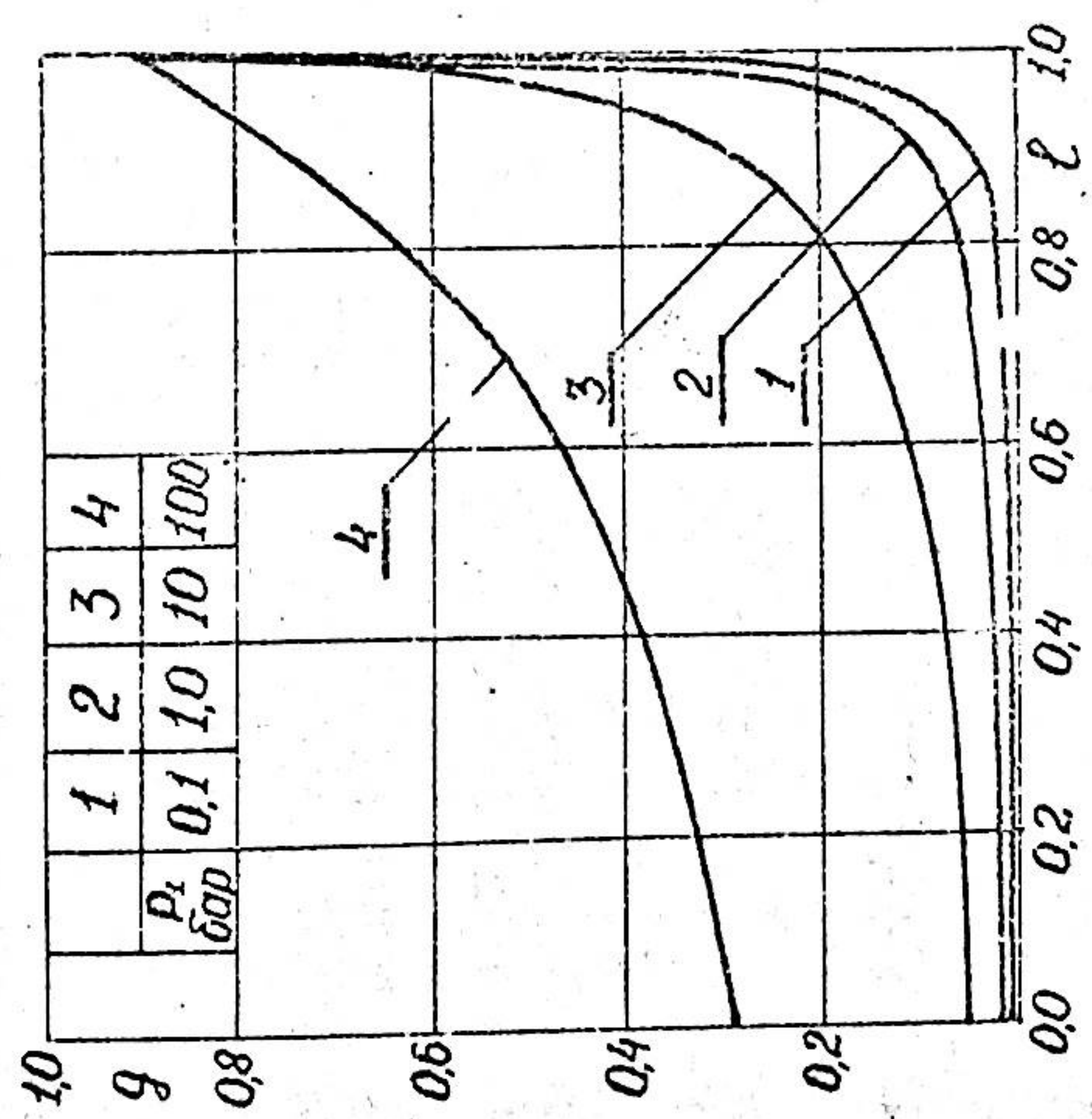


Рис. 3. Влияние внешнего диаметра на вид зависимости безразмерного массового расхода охлаждающего агента от положения поверхности фазового превращения $l, \mu_l Re = 0, 1$.

венные результаты получены с использованием физических свойств воды и водяного пара.

На рис. 3 показано влияние давления внешней среды на величину безразмерного расхода, откуда становится очевидной характерная особенность, являющаяся и основной причиной неустойчивости двухфазного пористого охлаждения - резкое, особенно для малых давлений в системе, уменьшение расхода при заглублении области кипения с внешней поверхности пластины.

Интересно отметить также, что уже при числе Рейнольдса потока $Re = 0,1$ заметно отклонение от режима Дарси - безразмерный расход жидкого охладителя при кипении на внешней поверхности / $\ell = 1,0$ / меньше единицы. По виду зависимости безразмерного расхода жидкости от числа Рейнольдса / рис. 4 / течение в пористой среде можно разделить на три режима: вязкостный или режим Дарси $Re < 0,01$; переходной $0,01 < Re < 100$; и инерционный $Re > 100$.

Распределение температуры во всех трех областях движения охладителя имеет единообразный вид /17/, где использованы соответствующие критерии пористого охлаждения /18/. Температура в области фазового превращения находится из выражения /19/.

В результате раздельного решения гидродинамической и тепловой составляющих процесса охлаждения получены выражения для давления и температуры в предполагаемой области фазового перехода /20/ - /21/, где координата ℓ является параметром. Сокращенно эту параметрическую зависимость запишем в виде /22/. Закрывает систему условие термодинамической равновесности фазового превращения /23/.

На рис. 5 представлены некоторые зависимости, описываемые уравнением /22/: кривые 1, 2, 3 и кривая насыщения /23/ воды - 4. Анализ поведения систем 1-3 при малых возмущениях определяющих параметров около установившегося состояния "а" показывает, что пересечение типа 1-4 и 2-4 характеризует устойчивые системы охлаждения, а пересечение типа 3-4 - неустойчивые. Следовательно

$$|20| \frac{P_0 - P_\ell}{P_0 - P_1} = g\ell + g^2\ell Re$$

$$|21| T_\ell = T_\infty + \frac{q \exp\left[\frac{GSc''}{\lambda_2}(\ell-1)\right] - Gz}{Gc'}$$

$$|22| P_\ell = P_\ell(T_\ell)$$

$$|23| P_\ell = P_H(T_\ell)$$

$$|24| \frac{dP_\ell}{dT_\ell} > \frac{dP_H}{dT_H}$$

$$|25| \delta \left[\alpha G V''(1-\ell) + \frac{\beta}{\rho''} G^2(1-\ell) \right] = \frac{z}{T_H(\ell)(V''-V')} \left\{ \frac{z}{c'} \left[\frac{q \exp k_2(\ell-1)}{Gz} - 1 \right] - [T_H(\ell) - T_\infty] \right\}$$

$$|26| P_0 - P_1 = \delta \left\{ G\alpha [V'\ell + V''(1-\ell)] + G^2\beta \left[\frac{\ell}{\rho'} + \frac{(1-\ell)}{\rho''} \right] \right\}$$

$$|27| i''(P_H) = \text{const}$$

$$|28| \frac{di_\ell}{d\ell} > 0$$

$$|29| i_\ell = i''$$

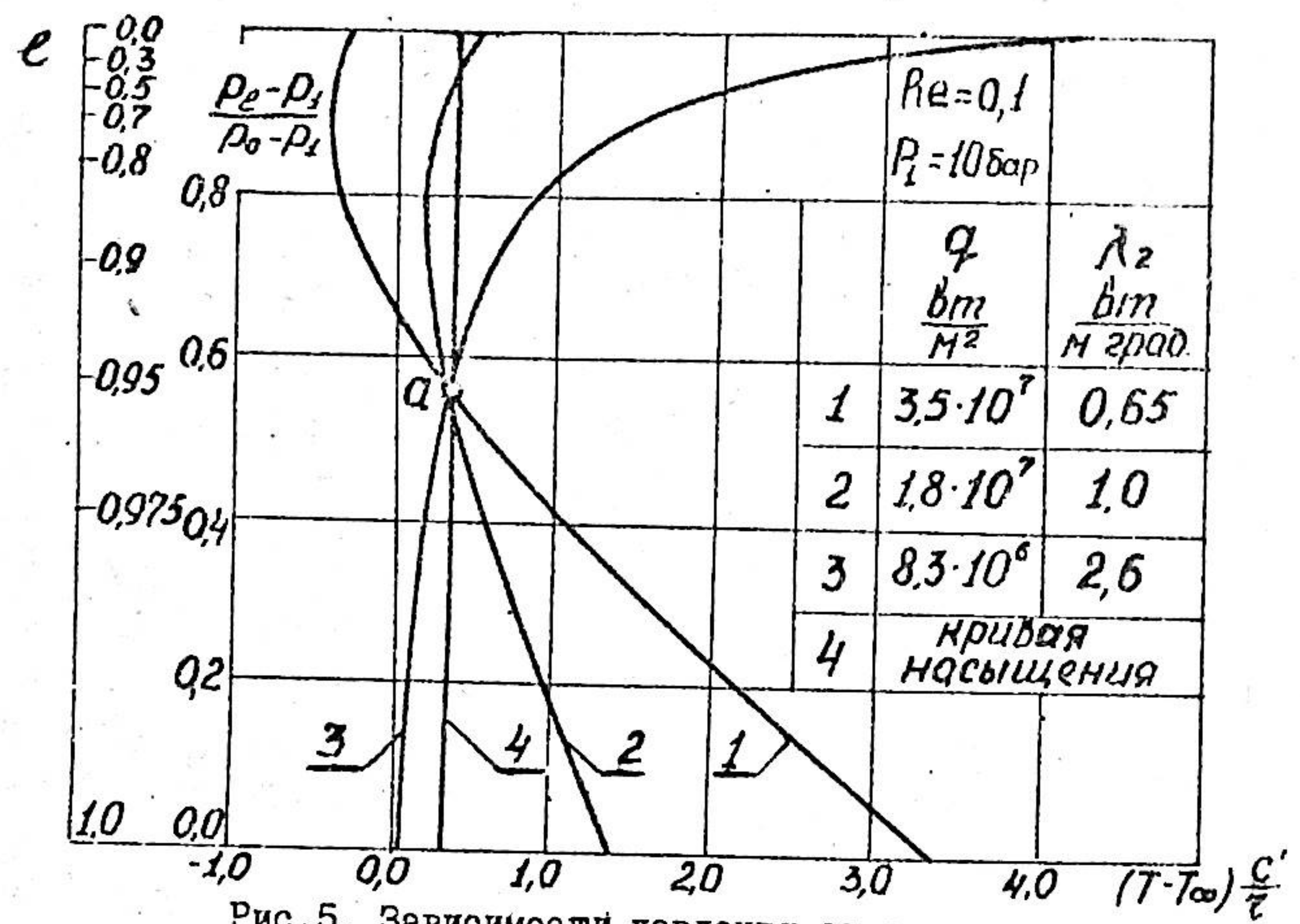


Рис. 5. Зависимости давления от температуры

в предполагаемой области фазового превращения.

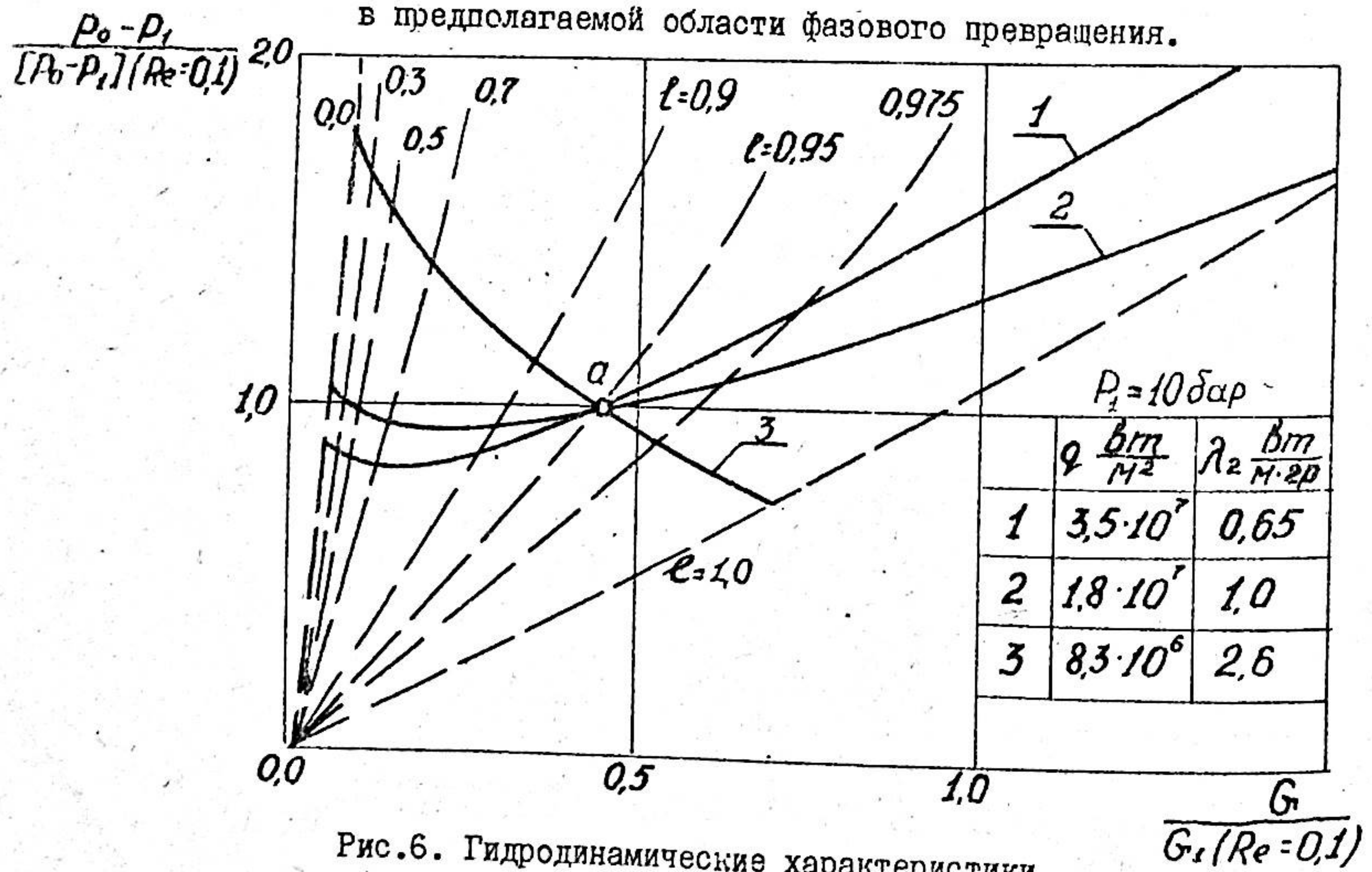


Рис. 6. Гидродинамические характеристики систем двухфазного пористого охлаждения.

условие устойчивости /24/ можно сформулировать следующим образом : для того, чтобы процесс двухфазного пористого охлаждения был устойчив, необходимо, чтобы угол наклона касательной к кривой зависимости давления от температуры в предполагаемой области фазового превращения был больше угла наклона касательной к кривой насыщения в рабочей точке.

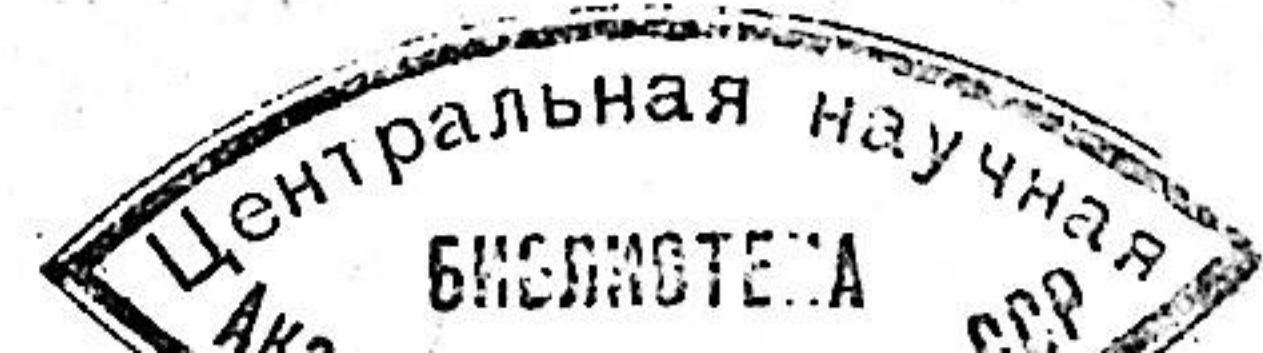
Анализ устойчивости системы двухфазного охлаждения проведен также с помощью ее гидродинамической характеристики, устанавливающей связь между расходом охладителя /решение полученного трансцендентного уравнения 25 / и перепадом давления на пластине / вычисляемом с помощью уравнения 26/ для различных значений координаты поверхности фазового превращения ℓ .

На рис. 6 приведены гидродинамические характеристики рассматривавшихся ранее систем. Рабочая точка "а" лежит на возрастающем участке характеристик 1 и 2 - соответствующие системы устойчивы, и на падающем участке характеристики неустойчивой системы 3.

В третьей главе определяется область параметров, обеспечивающих устойчивую и надежную работу равновесной системы охлаждения.

Установленное условие устойчивости /24/ используется для определения области устойчивости - области параметров системы, при изменении внутри которой она остается устойчивой.

Вода обладает одним очень интересным свойством - в широком диапазоне давлений от 1 бара до 100 бар энтальпия насыщенного пара с точностью до 4 % остается постоянной /27/. В связи с этим условие устойчивости охлаждаемой водой системы значительно упрощается /28/ и совместно с условием равновесности фазового перехода в виде /29/ дает возможность получить аналитическое выражение для параметров устойчивой системы /30/-/31/. Звездочкой обозначены параметры, соответствующие состоянию на границе устойчивости. Полученные соотношения приведем к виду /32/-/33/, удобному для выявления параметров, оказывающих влияние на устойчивость процесса.



$$|30| \lambda_2 < \lambda_2^* = \frac{\delta c'' \mu'}{\beta/\alpha} \frac{m}{2n} \left(-1 + \sqrt{1 + 4 \operatorname{Re} \frac{n}{m^2}} \right) (\ell - 1) \times$$

$$\times \left\{ 1 + \frac{2n \sqrt{1 + 4 \operatorname{Re} \frac{n}{m^2}}}{(\ell - 1) \left[\left(\frac{\nu'}{\nu} - 1 \right) \frac{2n}{m} + \left(\frac{\rho'}{\rho} - 1 \right) \left(-1 + \sqrt{1 + 4 \operatorname{Re} \frac{n}{m^2}} \right) \right]} \right\}$$

$$|31| q_f^* = (i'' - C_m T_\infty) \frac{\mu'}{\beta/\alpha} \frac{m}{2n} \left(-1 + \sqrt{1 + 4 \operatorname{Re} \frac{n}{m^2}} \right) \times$$

$$\times \exp \left\{ \frac{-1}{1 + \frac{2n \sqrt{1 + 4 \operatorname{Re} \frac{n}{m^2}}}{(\ell - 1) \left[\left(\frac{\nu'}{\nu} - 1 \right) \frac{2n}{m} + \left(\frac{\rho'}{\rho} - 1 \right) \left(-1 + \sqrt{1 + 4 \operatorname{Re} \frac{n}{m^2}} \right) \right]}} \right\}$$

$$|32| \lambda_2^* = \lambda_2^* (\ell, \operatorname{Re}, P_1, \beta/\alpha, S)$$

$$|33| q_f^* = q_f^* (\ell, \operatorname{Re}, P_1, \beta/\alpha, T_\infty)$$

$$|34| \lambda_2 = \lambda_2^{**} = \frac{\delta c'' \mu'}{\beta/\alpha} \frac{m}{2n} \left(-1 + \sqrt{1 + 4 \operatorname{Re} \frac{n}{m^2}} \right) \frac{1 - \ell}{\ln S}$$

$$|35| q_f^{**} = (i'' - C_m T_\infty) \frac{\mu'}{\beta/\alpha} \frac{m}{2n} \left(-1 + \sqrt{1 + 4 \operatorname{Re} \frac{n}{m^2}} \right) \cdot S$$

$$|36| \lambda_2^{**} = \lambda_2^* (\ell, \operatorname{Re}, P_1, S, \beta/\alpha, \delta)$$

$$|37| q_f^{**} = q_f^{**} (\ell, \operatorname{Re}, P_1, S, \beta/\alpha, T_\infty)$$

$$|38| S = 1 + \frac{[i(P_1, T_1^{**}) - i'']}{(i'' - C_m T_\infty)}$$

$$|39| \lambda_2^{**} < \lambda_2 < \lambda_2^*$$

$$|40| q_f^* < q < q_f^{**}$$

На рис. 7 в координатах $\lambda_2 - q$ отображено влияние числа Рейнольдса на характер области устойчивости при давлении окружающей среды $P_1 = 10$ бар. Область устойчивости обозначена штриховкой.

Кроме условия устойчивости, на параметры системы накладывается дополнительное ограничение условие надежности: температура внешней поверхности не должна превышать допустимой для надежной работы материала стенки.

Условие надежности приводится к аналитическим выражениям /34/ - /35/, или, в сокращенной записи /36/-/37/. Параметр S /38/ - характеризует максоимальную эффективность охладителя. Область устойчивой и надежной работы системы охлаждения должна удовлетворять обоим требованиям /39/ - /40/ / на рис. 8 выделена штриховкой /. Как следует из сравнения с рис. 7 условие надежности существенно сужает область допустимых параметров. Фазовый переход возможен только в очень тонком слое волизи внешней поверхности.

Необходимо обратить особое внимание на количественную сторону результатов: при $q = 10^6$ Вт/м² теплопроводность парового участка в устойчивой системе с фазовым превращением на внешней поверхности имеет максимальную, но тем не менее, весьма малую величину $\lambda_2 = 0,3$ Вт/м.град - точка I на рис. 7.

Установлено, что причина столь суровых ограничений на теплопроводность пористой среды устойчивой системы заключается в резком уменьшении расхода охладителя при заглублении области фазового превращения с внешней поверхности под влиянием небольших возмущений определяющих параметров процесса. Действительно, в этом случае так же быстро уменьшается и количество тепла, необходимое на подогрев и испарение жидкости. Поскольку внешний тепловой поток сохраняется на постоянном уровне, то в устойчивой системе образующийся избыток тепла полностью поглощается паром.

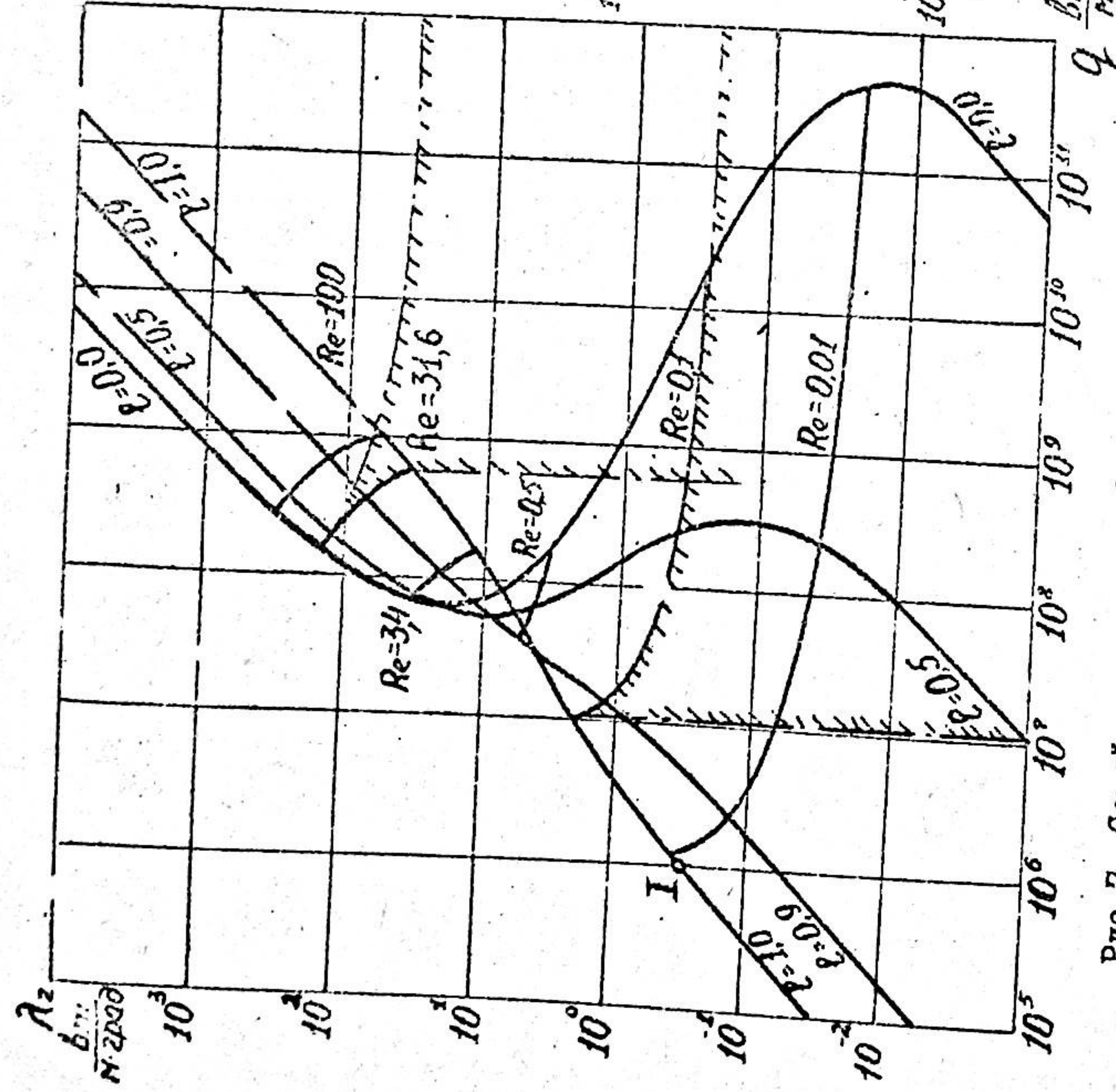


Рис.7. Семейства кривых $Re = const$ и $\lambda = const$ при $P_1 = 10 \text{ бар}$.

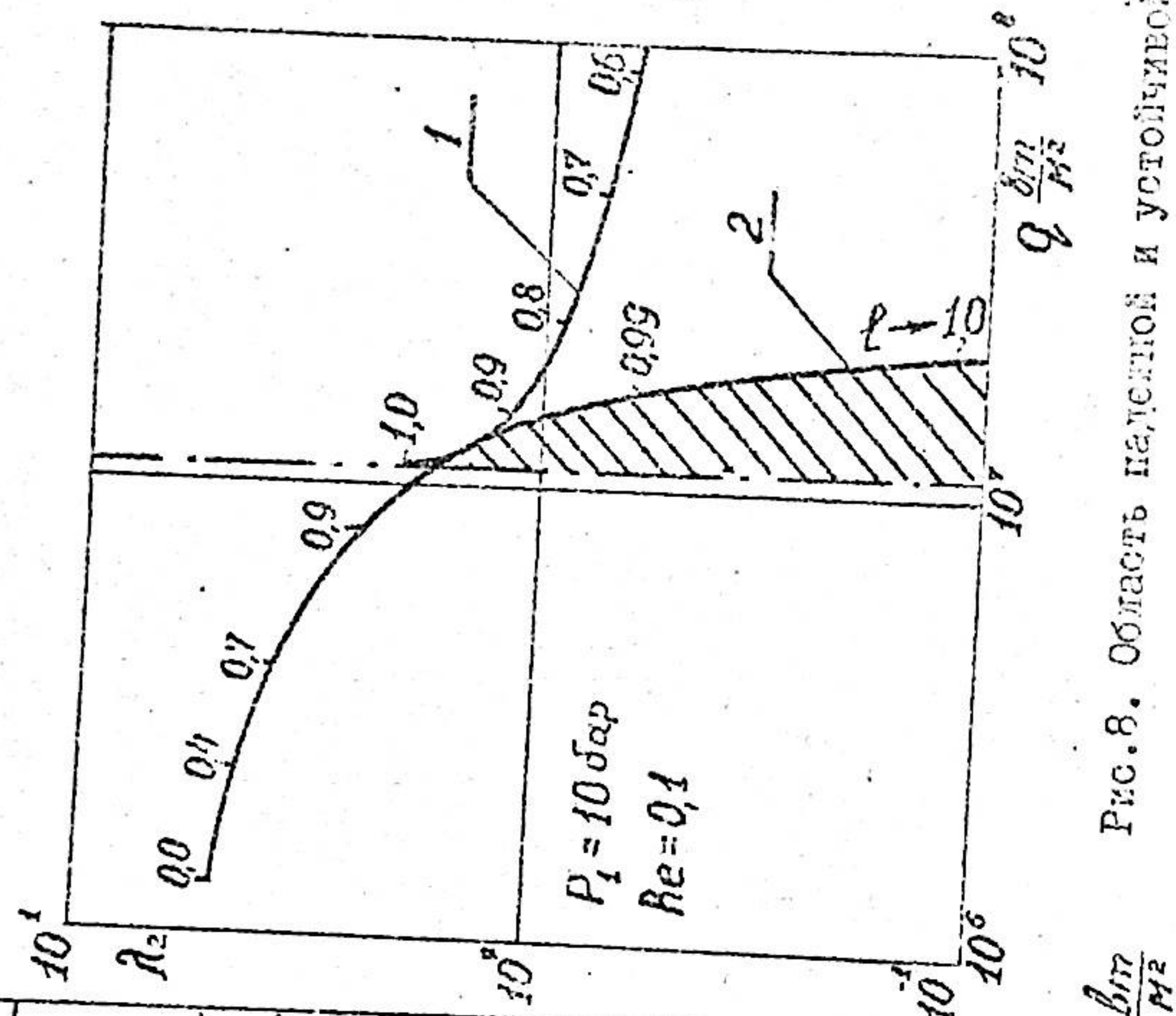


Рис.8. Область надежной и устойчивой работы равновесной системы охлаждения;
1 - граница устойчивости;
2 - граница надежности / $T_1^{**} = 1000^\circ\text{C}/\text{K}$.

При этом температура пара на выходе из пластины существенно повышается, что возможно лишь тогда, когда паровой участок обладает соответствующей эффективной теплопроводностью.

Очень важно отметить также, что подобные количественные результаты получаются из условия устойчивости, когда область фазового превращения находится не только где-то внутри пластины, но и на внешней поверхности /кривые $Re = const$ на рис.7 являются непрерывными и точка $Re = 1,0$ не есть особая/. Физические свойства обеих фаз охладителя в принятой модели полагаются постоянными и выбираются в состоянии на кривой насыщения при давлении, равном внешнему давлению. Поэтому, именно для фазового превращения на внешней поверхности, когда совсем нет парового участка движения охладителя, рассматриваемая модель даёт наиболее точные, а вместе с тем, и столь неожиданные результаты.

Проведённый анализ модели двухфазного пористого охлаждения является пока единственным и он позволил выяснить такие особенности процесса, как резкое уменьшение расхода охладителя при заглублении области кипения внутри однородной пластины, доминирующую роль парового участка в общем сопротивлении, а также влияние физических свойств охладителя и режимов течения на требуемые для устойчивой работы параметры пористой пластины. Всё это получено в аналитической форме и особенности процесса имеют настолько ярко выраженный характер, что и при точном численном решении не подвергнутся существенным качественным изменениям.

В четвёртой главе определяются свойства реальной системы двухфазного пористого охлаждения.

Исходя из физических представлений о связи между изменением расхода охладителя при перемещении поверхности фазового превращения и необходимой для устойчивой системы весьма малой величиной эффективного коэффициента теплопроводности парового участка, можно найти и выход из создавшегося положения :- необходимо каким-то образом обеспечить медленное изменение расхода при перемещении поверхности раздела фаз внутри пористой структуры.

Для расширения области параметров устойчивой и надёжной работы нами предлагается использование пористой стенки с высокими коэффициентами гидравлического сопротивления внутреннего, несущего слоя, и малым-внешнего, теплозащитного /рис.2/.

На рис. 9 показано влияние коэффициентов вязкостного сопротивления слоёв на вид зависимости безразмерного расхода от положения поверхности фазового превращения.

Применение двухслойной пластины позволяет не только существенно расширить область допустимых параметров равновесной системы, но и изменять её с помощью таких характеристик, как $\delta = \frac{L}{L_1}$ относительная толщина внутреннего слоя;

$\frac{\alpha_2}{\alpha_1}$ -отношение коэффициентов вязкостного и $\frac{\beta_1}{\beta_2}$ - инерционного сопротивления слоёв. Эти характеристики входят в более общую-отношение расходов охладителя при фазовом превращении на границе слоёв и на внешней поверхности пластины. В вязкостном режиме движения охладителя она имеет вид:

$$\frac{q(\delta)}{q(1)} = \frac{\delta + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} (1-\delta)}{\delta + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} (1-\delta) \frac{\beta_1}{\beta_2}}$$

Область устойчивой и надёжной работы с двухслойной стенкой в координатах $\nu_1 = \frac{q(\delta)}{q(1)}$ / K_2 - критерий пористого охлаждения

парового участка/ вычисляется из соотношения:

$$\frac{1}{1-\gamma} \left(1 - \frac{q(\delta)}{q(1)} \right) \frac{q(1)}{q(\delta)} = K_2^* < K_2 < K_2^{**} = \frac{\ln S}{1-\gamma}$$

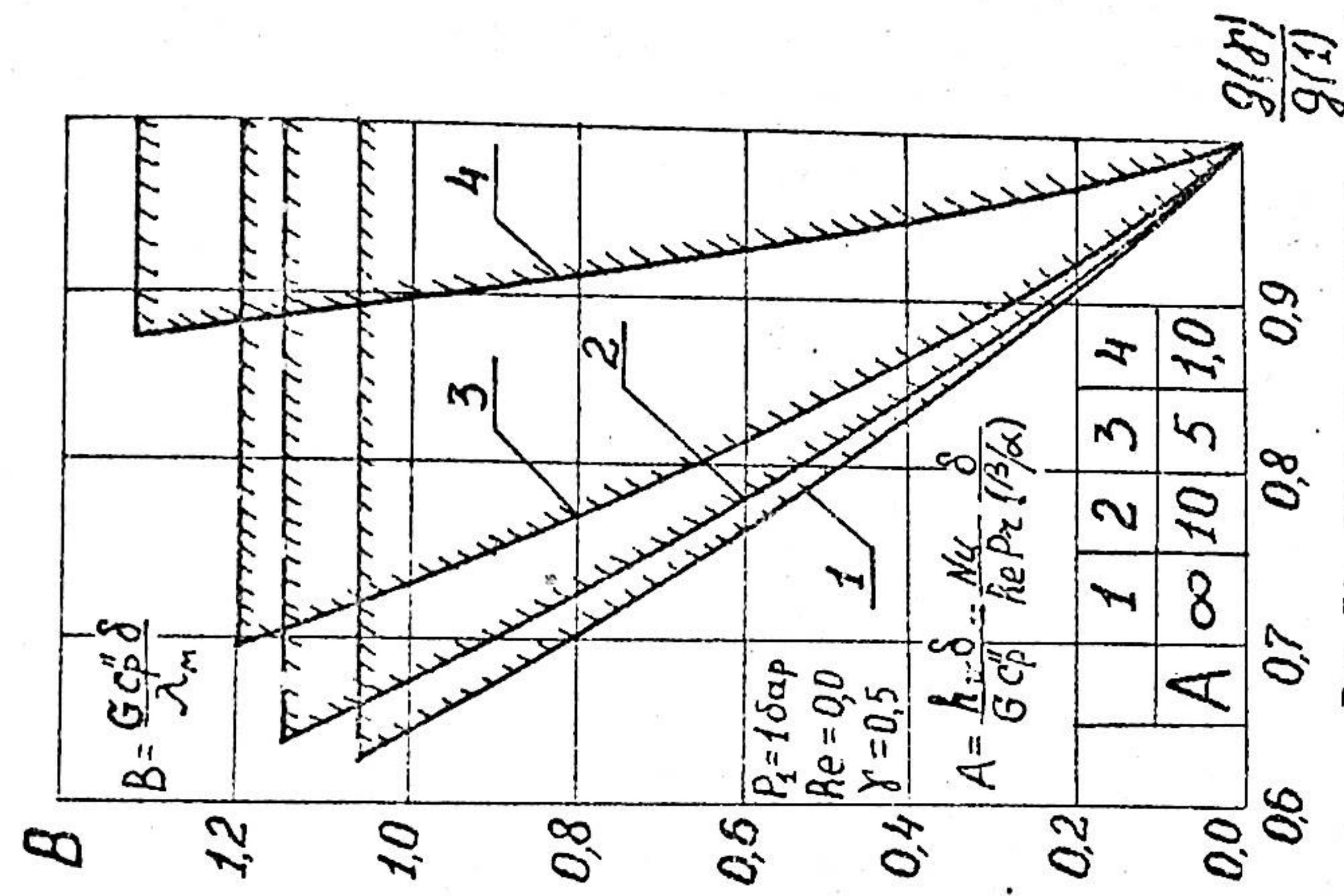


Рис.10. Область надёжной и устойчивой работы неравновесной системы охлаждения.

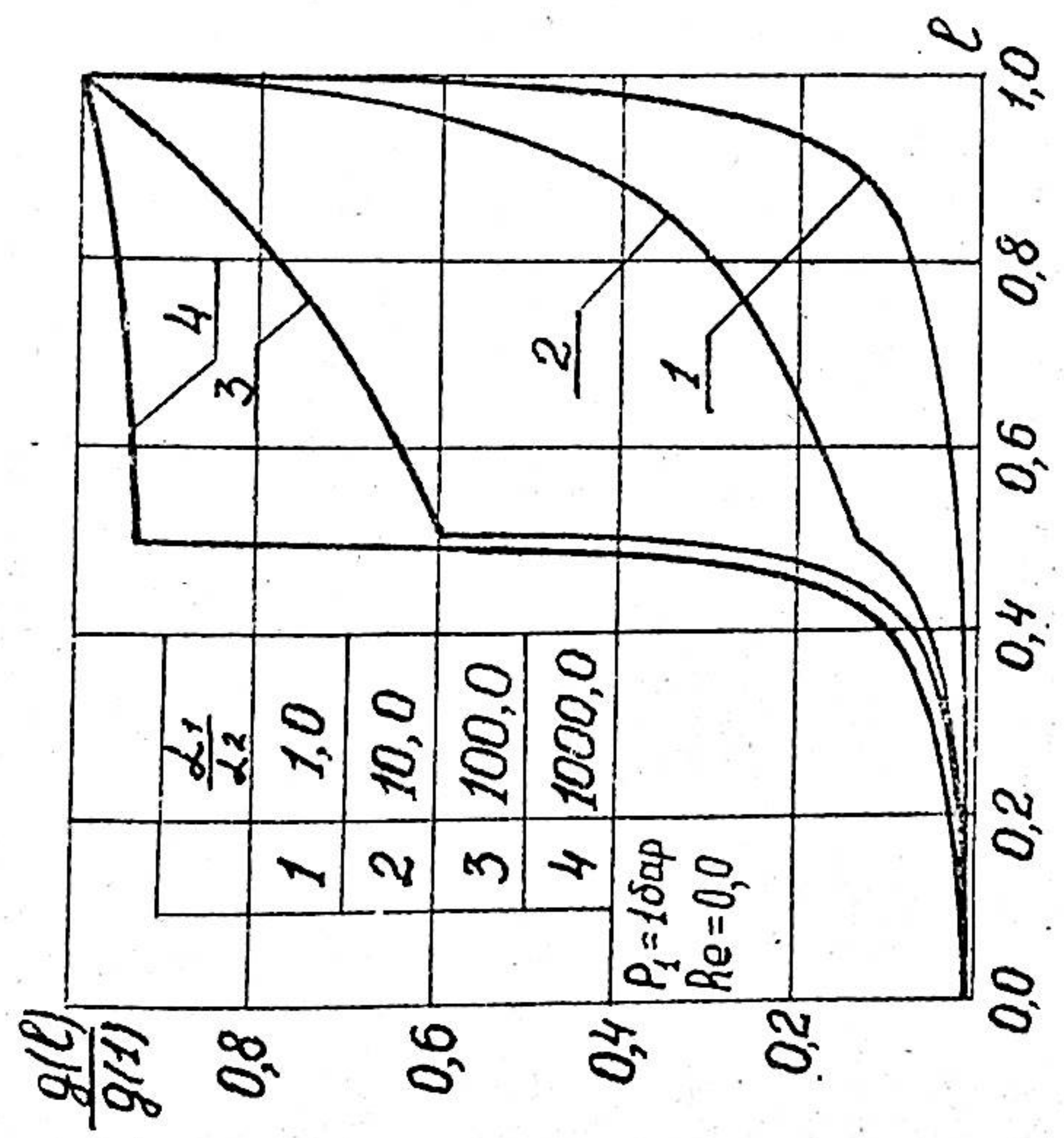


Рис.9. Влияние отношения коэффициентов вязкостного сопротивления слоёв на вид зависимости безразмерного массового расхода охладителя от положения поверхности фазового превращения в двухслойной пластине при $\gamma = 0,5$.

Проверка применимости равновесной модели охлаждения водой однородной пластины с учётом экспериментальных данных по внутрипористому конвективному теплообмену показала, что невозможно одновременно обеспечить соблюдение обоих условий - устойчивости и надёжности - поскольку минимальная разность температур охладителя и материала стенки в устойчивой системе превышает допустимую температуру поверхности. Другими словами: результаты, полученные с помощью равновесной модели для этого случая, исключают саму возможность её использования.

Развита неравновесная модель, учитывающая разность температур между охладителем и материалом стенки на паровом участке /рис.2/. В ней вместо уравнения /5/ вводится система уравнений:

$$\lambda_m \frac{d^2 T}{dx^2} = h_v (T-t) \quad /43 /$$

$$G \cdot c'' \frac{dt}{dx} = h_v (T-t) \quad /44 /$$

$$Nu = 3,44 \cdot 10^{-3} Re Pr \quad /45 /$$

$$Nu = \frac{h_v (\frac{\rho}{\lambda})^2}{\lambda}; \quad Re = \frac{G (\frac{\rho}{\lambda})}{\mu} \quad /46 /$$

На жидкостном участке принимается выполнение локального теплового равновесия. Объясняется это тем, что разность температур охладителя и материала в конце жидкостного участка становится равной перегреву при кипении в пористой структуре, величина которого незначительна и принимается за начальную разность температур пара и матрицы в неравновесной модели.

Хотя конечная величина интенсивности объёмного теплообмена и сужает область устойчивой и надёжной работы системы охлаждения / что следует из рис.10 - рис.12/, но не исключает возможности её практического осуществления, что и подтверждается имеющимися экспериментальными данными.

Анализ устойчивого двухфазного пористого охлаждения

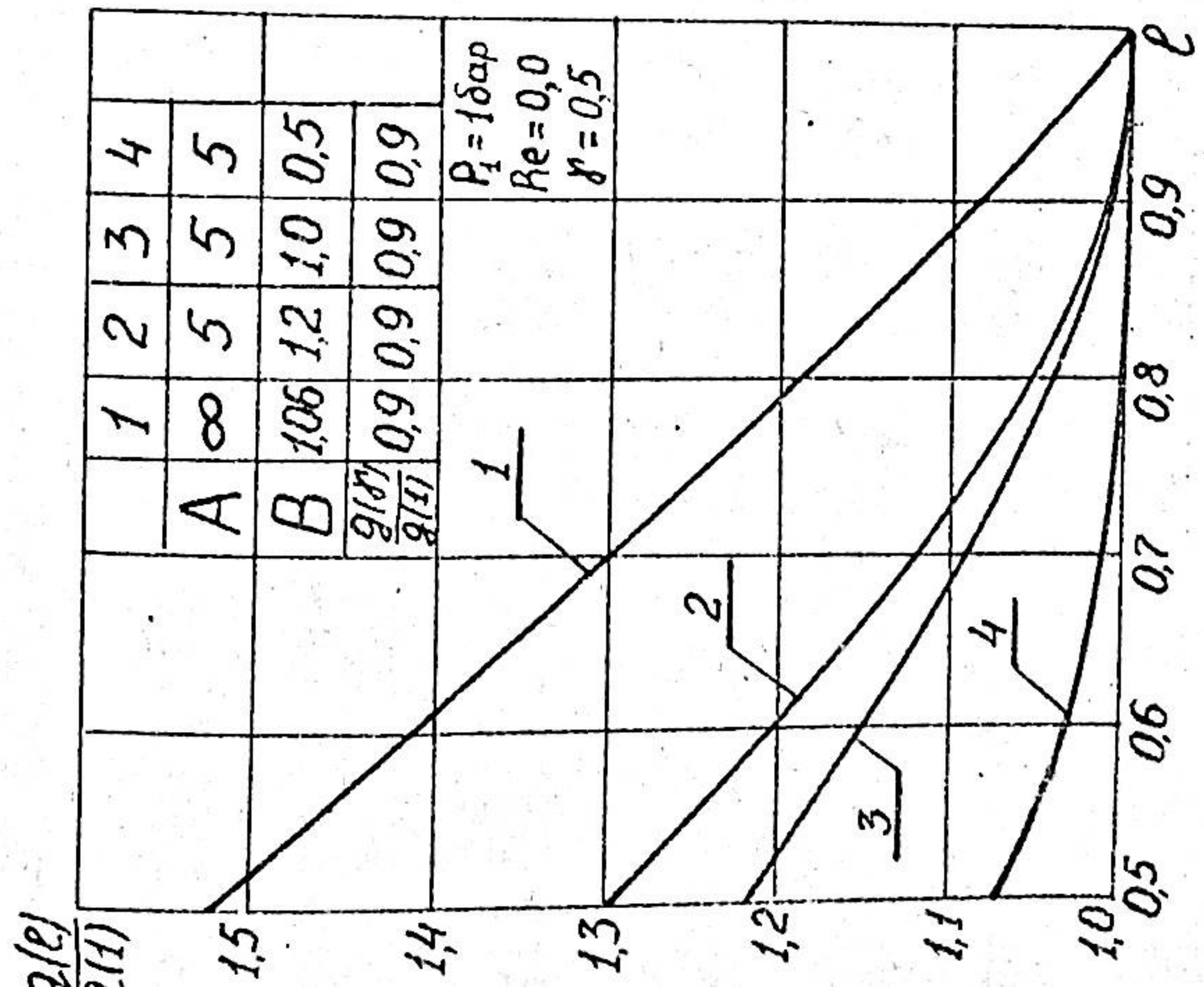


Рис.11. Зависимость плотности внешнего теплового потока от положения поверхности фазового превращения.

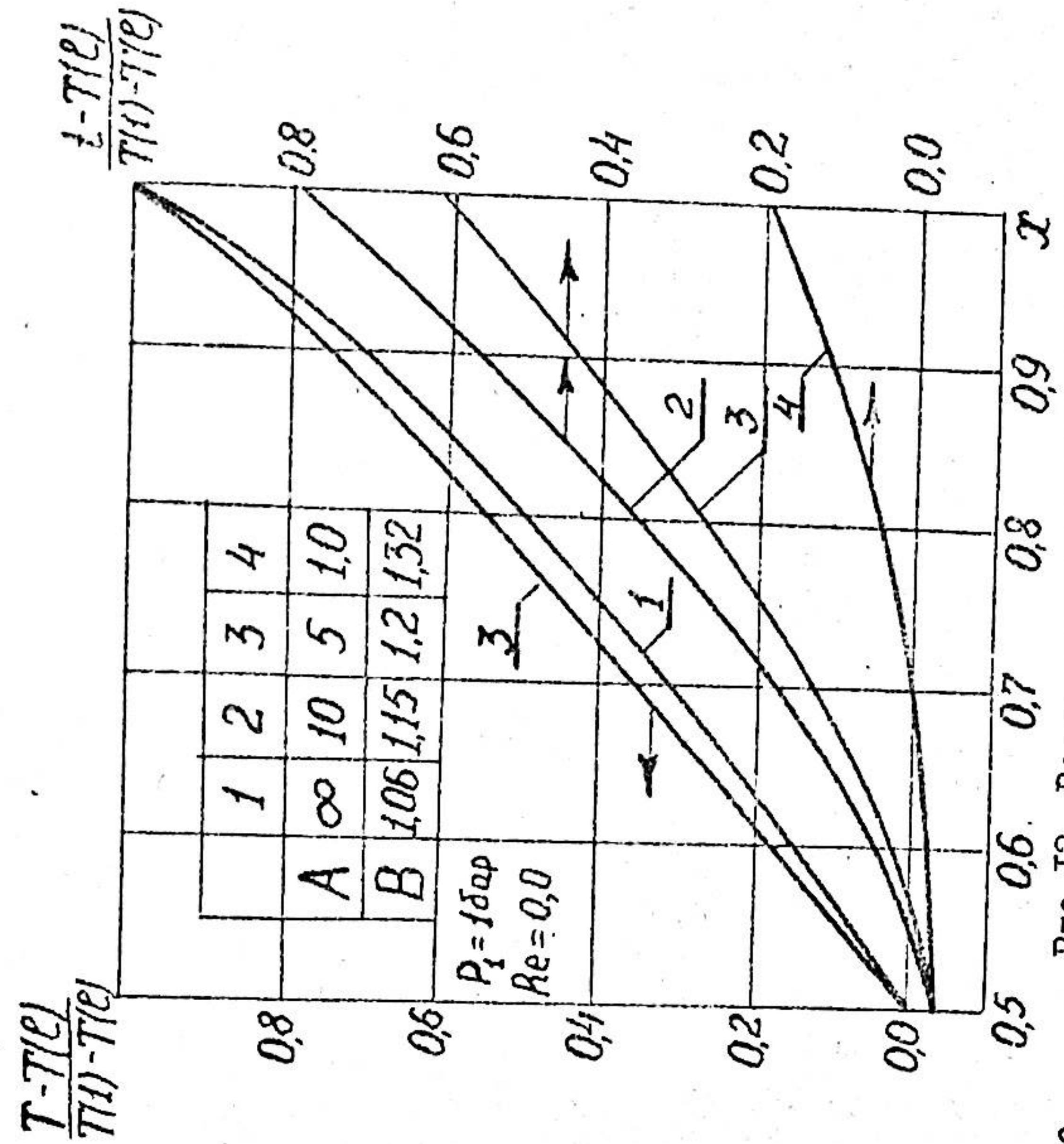


Рис.12. Распределение температуры в материале и в охладителе при фазовом превращении в середине пористой пластины.

пластины с поверхностным нагревом позволяет сделать качественные заключения и об основных структурных характеристиках элемента с объёмным тепловыделением, при которых достигается устойчивость двухфазного охлаждения. Пористый элемент должен состоять как минимум из двух слоев с существенно отличающимися гидравлическими характеристиками. Внутренняя оболочка /цилиндрического/ элемента должна обладать значительно более высокими коэффициентами вязкостного и инерционного сопротивления по сравнению с соответствующими характеристиками тепловыделяющего материала. Область кипения целиком располагается внутри тепловыделяющего материала.

Объёмное тепловыделение может происходить или за счёт расщепления ядерного горючего, или при прохождении электрического тока.

Очевидны следующие достоинства двухфазного пористого охлаждения тепловыделяющих элементов ядерных реакторов:

а/ необычайно высокие плотности объёмного тепловыделения, достигаемые за счёт охлаждения кипением жидкости в пористой матрице ;

б/ га выходе из системы возможно получение перегретого пара с любой величиной перегрева, что исключает необходимость дополнительного пароперегревающего контура.

Применение криогенных жидкостей для охлаждения линий электропередач большой мощности позволит поддерживать их при низкой температуре и тем самым значительно снизить потери передаваемой энергии

Подводя итог выполненному теоретическому исследованию, можно сделать следующие выводы.

1. Представлена равновесная модель двухфазного пористого охлаждения с фазовым превращением внутри однородной плоской пористой пластины, подверженной поверхностному нагреву.

Показана неразрывность тепловой и гидродинамической составляющих процесса. Разработан метод решения замкнутой системы дифференциальных уравнений, описывающих гидродинамику и теплообмен фильтрующегося сквозь пористую стенку охладителя при неизвестном положении поверхности его фазового перехода.

Проанализированы закономерности фильтрационного движения жидкости с фазовым переходом внутри пористой пластины. Выявлена одна из существенных особенностей процесса - резкое уменьшение расхода охладителя при незначительном заглублении зоны кипения с внешней поверхности однородной стенки, что и является основной причиной неустойчивости транспирационного охлаждения.

2. На основе объединения решений уравнений энергии и уравнения движения жидкости в пористой среде построена зависимость давления от температуры в области фазового превращения при различных положениях этой области внутри стенки. Из взаимного поведения полученной кривой и кривой насыщения в результате анализа поведения системы около установившегося состояния при малых возмущениях определяющих параметров выводится заключение об устойчивости системы. Сформулировано условие устойчивости процесса.

Проверка устойчивости системы охлаждения с помощью её гидродинамической характеристики подтверждает справедливость выведенного условия.

3. С использованием условия устойчивости двухфазного пористого охлаждения определена область параметров, при изменении внутри которой система остаётся устойчивой. Проанализировано влияние определяющих параметров процесса на требуемые для устойчивой работы характеристики пористой пластины. Условие устойчивости накладывает очень жёсткие ограничения на теплофизические свойства пластины. Из полученных результатов становится очевидной одна из причин неудачных попыток создания устойчивых систем пористого охлаждения с использованием воды в качестве рабочего тела.

Условие надёжной работы пористого материала с температурой внешней поверхности в допустимых пределах ещё более сужает область его теплофизических характеристик.

4. Установлено, что применение двухслойной пористой пластины позволяет не только значительно расширить область устойчивой и надёжной работы равновесной системы двухфазного охлаждения, но и изменять её в необходимом диапазоне с помощью соответствующих структурных характеристик двухслойной стенки.

5. Проверка равновесной модели с учётом экспериментальных данных по внутрипористому конвективному теплообмену выявила её неприменимость к устойчивой системе охлаждения водой однородной стенки вследствие нарушения условия надёжности.

Развита неравновесная модель, учитывающая разность температур между охладителем и материалом стенки на паровом участке. На её основе показано, что в принципе невозможно создать устойчивую систему двухфазного охлаждения однородной пластины с использованием воды в качестве рабочего тела.

Использование двухслойной пористой пластины даёт возможность добиться устойчивости неравновесной системы, что и подтверждается имеющимися экспериментальными данными.

6. Разработан метод определения структурных и теплофизических характеристик двухслойной пластины, обеспечивающих устойчивую и надёжную работу неравновесной системы охлаждения при заданных внешних условиях и допустимых возмущениях таких параметров, как плотность внешнего теплового потока, давление подачи и давление внешней среды, начальная температура охладителя.

7. Анализ устойчивого двухфазного охлаждения пористой пластины с поверхностным нагревом позволяет сделать качественные заключения и об основных структурных характеристиках элементов с объёмным тепловыделением, необходимых для устойчивого двухфазного пористого охлаждения. Отмечаются особые преимущества такого метода охлаждения в применении к топливным элементам в ядерной энергетике и линиям электропередач большой мощности.

Обозначения : X, x - размерная и безразмерная координаты; G, g - размерный и безразмерный расход охладителя; U, u - размерная и безразмерная координаты области фазового превращения охладителя; δ - толщина пластины; Γ, γ - размерная и безразмерная толщины внутреннего слоя двухслойной стенки; P - давление; t - температура; ψ - плотность внешнего теплового потока; α - вязкостный и β - инерционный коэффициенты сопротивления пористого материала; λ - теплопроводность; μ - динамическая вязкость; ν - кинематическая вязкость; ρ - плотность охладителя; i - энтальпия; z - полная теплота парообразования; c - теплоёмкость; h_v - объёмный коэффициент теплообмена; Re - критерий Рейнольдса потока охладителя.

Индексы: o - в области жидкости; I - в области жидкость-твёрдое тело; -2 - в области пар-твёрдое тело; ℓ - в области фазового превращения; N - в состоянии насыщения; $'$ - физические свойства жидкого охладителя в состоянии насыщения; $''$ - то же для пара; M - пористый материал; $*$ - параметры на границе устойчивости; $**$ - параметры на границе надёжности.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах :

1. Майоров В.А., Васильев Л.Л. "Свойства двухфазной системы пористого охлаждения". Сб. "Процессы переноса энергии и вещества при низких температурах в вакууме". Минск, ИТМО АН БССР, 55-75, 1973г.

2. Майоров В.А., Васильев Л.Л. "Определение параметров устойчивой системы двухфазного пористого охлаждения". Сб. "Процессы переноса энергии и вещества при низких температурах в вакууме". Минск, ИТМО АН БССР, 76-93, 1973г.

3. Майоров В.А., Васильев Л.Л. "Фильтрация жидкости и пара внутри пористой стенки", Инженерно-физический журнал, том XXIV, № 6, 1973, 1023-1027.

АТ № 14254. Подписано к печати 6.УП.73г. Заказ № 154.
Тираж 120 экз. Отпечатано на ротапринтере Института
тепло- и массообмена, г.Минск, Подлеоная, 15.