

6  
А 3

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Инженер Р. С. Лепилин

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ВОДЯНОГО  
ОБЪЕМА ПРИ НАЛИЧИИ БОЛЬШОГО БАРБОТАЖНОГО  
СЛОЯ И В УСЛОВИЯХ ОРГАНИЗОВАННОГО  
ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

## 1. Состояние вопроса и задачи исследования

В парогенерирующей аппаратуре многих энергетических установок предполагается значительное увеличение удельных нагрузок зеркала испарения и толщины барботажного слоя по сравнению с величинами, имеющими место в котельной практике.

Процесс барботажа пара в больших водяных слоях в настоящее время изучен еще недостаточно, а между тем гидродинамика водяного объема кипящего аппарата оказывает большое влияние на условия его работы и должна быть учтена при проектировании его. Так, от доли сечения, занимаемой паром в барботажном слое, зависит набухание слоя и положение действительного уровня, которое сильно сказывается на влажности генерируемого пара и определяет выбор высоты парового объема. В то же время в кипящем аппарате паросодержание существенно влияет на его реактивность.

Для определения влияния гидродинамики барботажного слоя на влажность генерируемого пара, расчета защиты и оценки равномерности работы аппарата во времени необходимо знать характер распределения паросодержания не только по высоте барботажного слоя, но и по его горизонтальному сечению. Эта зависимость должна быть установлена для условий резко выраженной неравномерности распределения пара во входном сечении барботера, так как такая неравномерность распределения в начальном участке барботажного слоя характерна для кипящих аппаратов.

Известные в настоящее время исследования по гидродинамике водяного объема в барабане проводились в основном в условиях, близких к тем, которые имеют место в обычных котельных агрегатах. Схемы движения сред (воды и пара) в других энергетических установках нередко существенно отличаются от тех, которые могут считаться типичными для котельных установок. Исследования гидродинамики водяного объема при больших барботажных слоях про-

водились только в трубах малого диаметра. Барботажа в условиях направленного движения среды при больших поперечных слоях аппарата вообще не изучался (ни при больших, ни при малых высотах водяного объема).

Нельзя не отметить также, что если в настоящее время паросодержание на стабильном участке можно определить с достаточной точностью, то распределение паросодержания по высоте переходной зоны изучено явно недостаточно. Между тем, гидродинамика потока в переходной зоне определяет истинный уровень в аппарате (при выбранном весовом уровне), который необходимо знать как для расположения сепарационных устройств в паровом объеме, так и для организации работы опускного циркуляционного контура в аппарате.

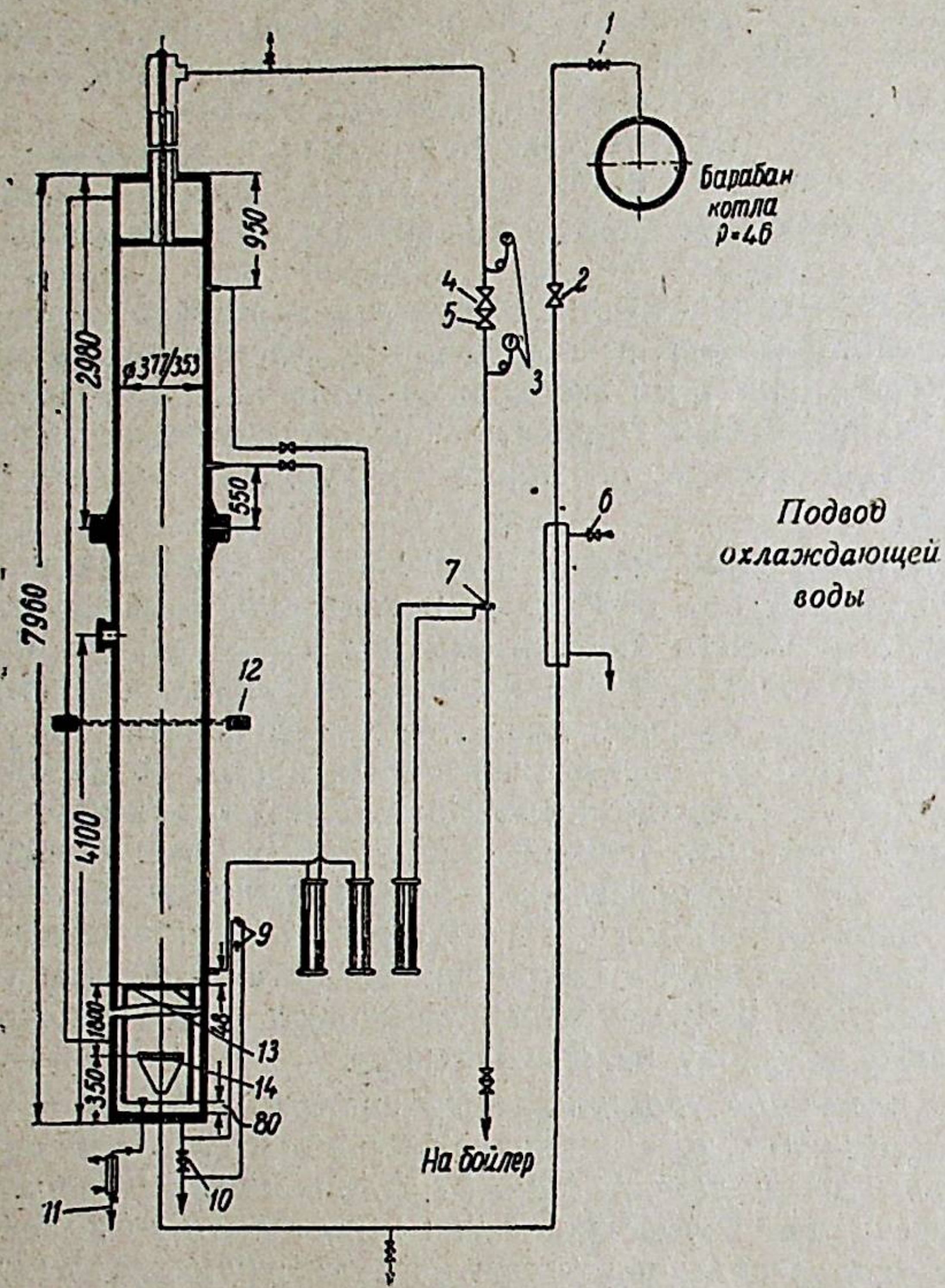
Таким образом, можно отметить, что гидродинамика водяного объема при барботаже в условиях, характерных для аппарата кипящего типа, имеет ряд особенностей, которые к настоящему времени не могут считаться изученными. Это относится как к слоям, достаточно отдаленным от уровня, так и к близким к нему (переходная зона). Однако, если гидродинамика водяного объема в слоях, отдаленных от переходной зоны, для условий, характерных для котельных агрегатов, достаточно изучена, то по гидродинамике потока в переходной зоне и для этих аппаратов до настоящего времени не предложено ни одной зависимости, с помощью которой оказалось бы возможным установить величины, характеризующие эту зону количественно.

Исследование гидродинамики водяного объема в условиях, характерных для аппаратов кипящего типа, явилось основной задачей данной работы. Установленные при этом зависимости для переходной зоны имеют общий характер и могут быть использованы при расчетах гидродинамики в паросепараторах различных типов.

## 2. Схема установки и методика проведения опытов

Экспериментальная установка представляет собой вертикальную колонку диаметром  $377 \times 12$  мм и высотой 7960 мм (фиг. 1). На расстоянии 2150 мм от низа колонки установлен распределительный дырчатый щит, наглухо приваренный по всему периметру к юбке 13.

В колонку подается насыщенный пар от одного из котлов ТЭЦ МЭИ (котла № 4). Подводящий паропровод вре-



Фиг. 1. Схема экспериментальной установки:  
 1 — запорные вентили подводящего паропровода; 2 — регулировочный вентиль подводящего паропровода; 3 — образцовые манометры; 4 — запорный вентиль на сбросном паропроводе; 5 — регулировочный вентиль на сбросном паропроводе; 6 — холодильник; 7 — диафрагма замера расхода пара; 8 — запорные вентили перед бойлером; 9 — обводные вентили; 10 — дренажные вентили; 11 — отборник пробы воды; 12 — просвечивающее устройство; 13 — подтопленный дырчатый щит; 14 — распределительный конус подводящего паропровода

зается в днище колонки и заканчивается коническим патрубком, перекрытым дырчатым листом 14 с отверстиями диаметром 6 мм. На подводящем паропроводе установлен холодильник 6, предназначенный для частичной конденсации пара. Это позволяет поднимать уровень в колонке во время ее работы. Для снижения уровня предусмотрена дренажная линия с запорными вентилями 10. Чтобы регулировка положения уровня производилась более плавно, запорные вентили 10, в свою очередь, имеют байпас с двумя игольчатыми вентилями 9. Отвод пара из колонки осуществляется через сбросной паропровод диаметром  $133 \times 6$  мм в бойлер ТЭЦ.

На подводящем паропроводе установлены два запорных 1 и регулировочный 2 вентили. На сбросном паропроводе имеются запорный и регулировочный вентили 4 и 5 и два запорных вентилей перед бойлером 8. С помощью этой аппаратуры производилось изменение режима, т. е. регулировалось давление и расход пара.

Для замера расхода пара через колонку на сбросном паропроводе имеется диафрагма 7, перепад на которой фиксируется дифференциальным манометром ДТ-150, залитым ртутью.

Замер давления в колонке и сбросном паропроводе осуществляется двумя манометрами 3.

Наблюдение за положением весового уровня в процессе проведения эксперимента осуществлялось по показаниям двух дифференциальных манометров, залитых ртутью. Один из импульсов у обоих манометров общий и подводится от штуцера, расположенного на 40 мм выше распределительного щита. Две другие импульсные трубки подсоединены к манометрам от штуцеров, врезанных в колонку на высоте 950 и 2430 мм от верха колонки.

Определение паросодержания в зоне барботажа проводится методом просвечивания гамма-лучами. В качестве радиоактивного источника применяется кобальт 60. Интенсивность источника  $\sim 20$  милликюри.

Источник и счетчик заключены в свинцовые контейнеры с толщиной стенки  $\sim 40$  мм. Диаметр отверстий для создания направленного гамма-луча составляет 14 мм.

Для перемещения просвечивающего устройства создан механизм передвижения, позволяющий производить вертикальное и горизонтальное перемещение. Положение источ-

ника фиксируется горизонтальной и вертикальной мерными шкалами.

Из колонки предусмотрен отбор пробы воды для анализа.

Колонка, подводящий и сбрасывающий трубопроводы покрыты тепловой изоляцией.

При пуске и прогреве колонки, вследствие теплопотерь в окружающую среду, происходит интенсивная конденсация пара. Сконденсировавшийся пар продувается через дренажную линию колонки. При этом установка отмывается от продуктов коррозии, образовавшихся в период останова.

После прогрева устанавливается требуемое давление и расход пара. Для ускорения подъема уровня в колонке включается холодильник 6. После того, как уровень в колонке достигнет заданной отметки, регулирование его производится сбросом некоторого количества конденсата. При этом в первые часы работы, до окончательного прогрева установки, количество дренируемого конденсата постепенно убывает. После установления давления и расхода пара стабильность положения уровня контролируется по изменению показаний дифференциальных манометров.

Все опыты проводились на конденсатном режиме. Для контроля за содержанием воды из колонки во время проведения опытов периодически производились отборы проб, которые подвергались анализу. В отобранных пробах определялось общее содержание электрометрическим методом. Для этого использовался лабораторный солемер типа ЛС-1, шкала которого проградуирована по проводимости раствора в пересчете на хлористый натрий. Как показали замеры, содержание воды в процессе проведения опытов колебалось в пределах 1,5—2,0 мг/л в пересчете на хлористый натрий.

Паросодержание пароводяной смеси определялось по степени ослабления пучка гамма-лучей при просвечивании колонки по методике, разработанной в ЭНИНе М. А. Стыриковичем и З. Л. Миропольским. Число импульсов регистрировалось с помощью установки Б-2.

### 3. Исследование работы большого барботажного слоя

Исследование процесса барботажа в условиях большого водяного слоя проведено при различных высотах барботажного слоя (от 0,5 до 5,3 м), различных нагрузках (при  $w_0$  от 0,18 до 1,4 м/сек.) при давлениях от 17 до 45 ата. При

этом на различных режимах определялось распределение паросодержания по горизонтальным сечениям и по высоте барботажного слоя в условиях как равномерной подачи пара, так и при создании значительных неравномерностей. Кроме того, в зависимости от тех же факторов и величины барботажного слоя были определены размеры переходной зоны.

#### а) Распределение паросодержания по сечению на различной высоте барботажного слоя.

Характер движения и распределения пара по сечению колонки изучался при давлении 33 ата в условиях подачи пара по всему сечению щита. Распределение паросодержания по сечению колонки определялось просвечиванием по хордам при различных высотах барботажного слоя и нагрузках.

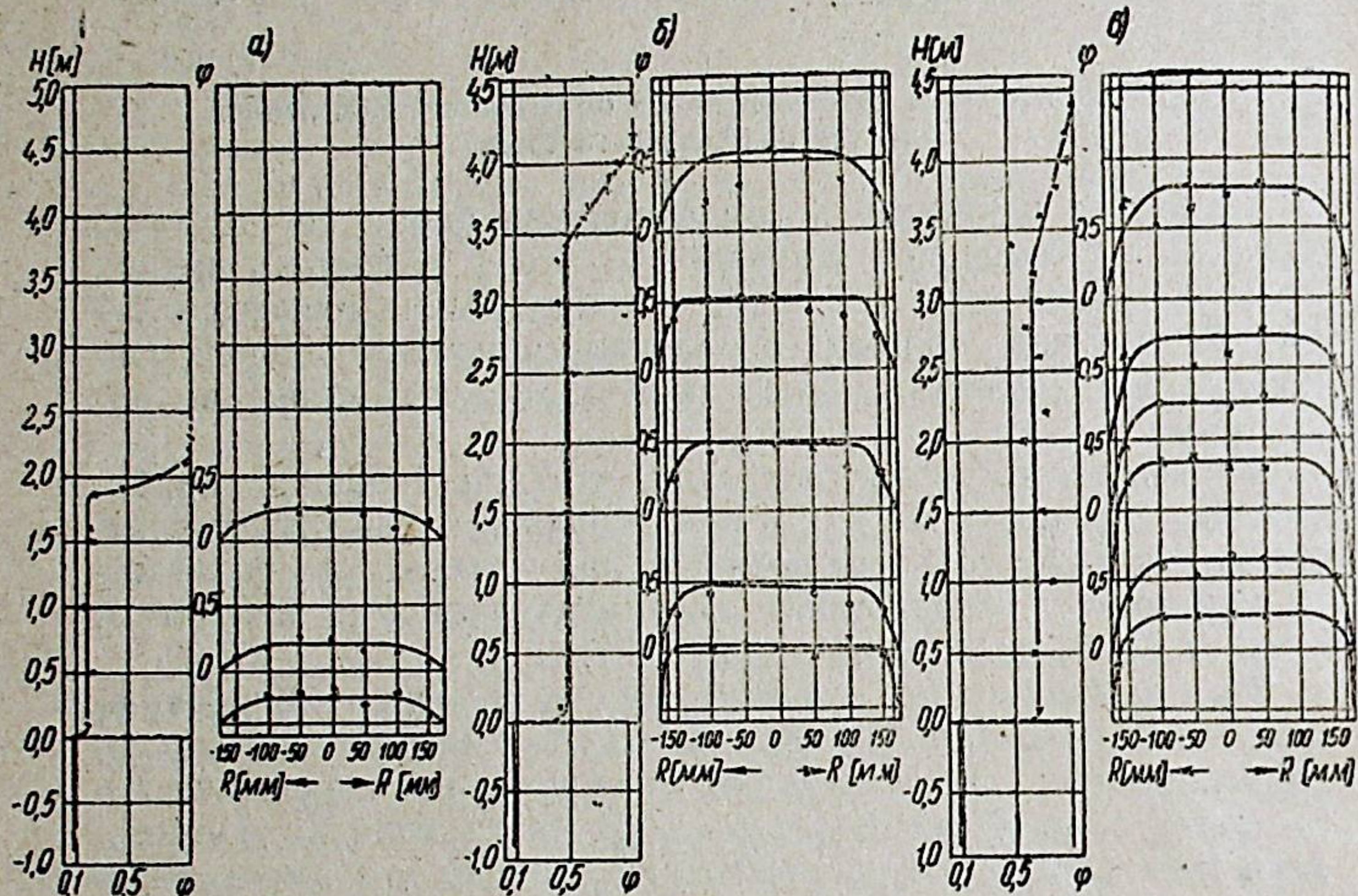
Проведенные опыты показали, что для больших барботажных слоев, так же как и при небольших существует участок стабильного паросодержания, над которым располагается переходная зона. Высота переходной зоны не зависит от высоты барботажного слоя (фиг. 2).

Просвечивание по горизонтальному сечению барботажного слоя показало безусловное отсутствие стержневого потока пара (фиг. 3). Как видно из опытов, распределение пара почти равномерно в центральной части колонки. Паросодержание снижается на периферии, однако это имеет место только вблизи стенок. Характер распределения паросодержания по горизонтальному сечению на различной высоте барботажного слоя примерно одинаков.

Для определения сходимости полученных значений паросодержаний на стабильном участке (осредненных по горизонтальному сечению барботажного слоя) с результатами ранее проведенных опытов построена фиг. 4, на которой нанесены опытные данные в критериальной обработке. Как видно из фиг. 4, совпадение вновь полученных экспериментальных данных с имевшимися вполне удовлетворительное.

В проведенных опытах в отверстиях распределительного щита в зависимости от нагрузки не всегда создавались скорости пара, при которых образовывалась устойчивая паровая подушка. Однако паросодержание над распределительным щитом в толще барботажного слоя, как показали опыты, тем не менее оставалось равномерным при всех нагрузках. Это ставит под сомнение безусловную связь равномер-

ности распределения паросодержания по сечению и наличие паровой подушки. Возникает предположение о новом характерном свойстве больших барботажных слоев, заключающемся в выравнивающем воздействии слоя на распределение пара по сечению.



Фиг. 3. Распределение паросодержания по высоте колонки (по оси и по хордам) при различных нагрузках для 33 ата

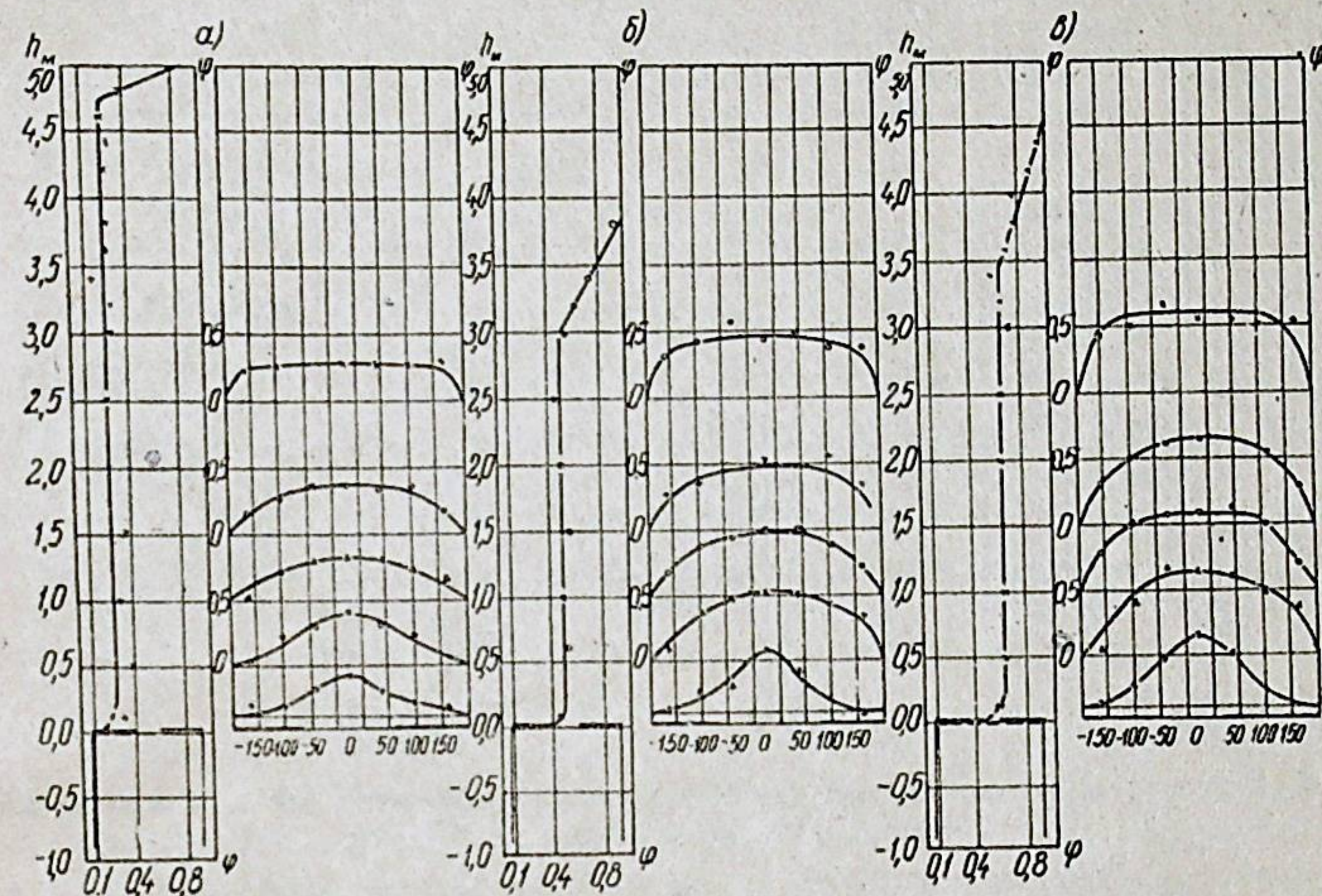
а)	б)	в)
$D = 1000 \text{ кг/час}$	$D = 3050 \text{ кг/час}$	$D = 6150 \text{ кг/час}$
$h_{\text{вес}} = 1530 \text{ мм}$	$h_{\text{вес}} = 1930 \text{ мм}$	$h_{\text{вес}} = 1632 \text{ мм}$
$R = 630 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{час}$	$R = 1930 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{час}$	$R = 3870 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{час}$
$W_0'' = 0,176 \text{ м/сек}$	$W_0'' = 0,535 \text{ м/сек}$	$W_0'' = 1,07 \text{ м/сек}$

С целью проверки выравнивающего воздействия слоя был поставлен специальный опыт с созданием значительной неравномерности по сечению колонки.

Для этого распределительный щит перекрывался металлическим кольцом с отверстием диаметром 150 мм. Открытая площадь щита становилась при этом равной 25% от первоначальной величины, т. е. снижалась в четыре раза.

Опыты с кольцом проводились при давлении 33 ата, на разных нагрузках и с разными высотами барботажного слоя (фиг. 5).

Как видно из результатов опытов (фиг. 5) в слое, расположенном около распределительного щита, неравномерность распределения больше. В дальнейшем устанавливается такое же распределение пара по сечению, которое наблюдалось ранее.

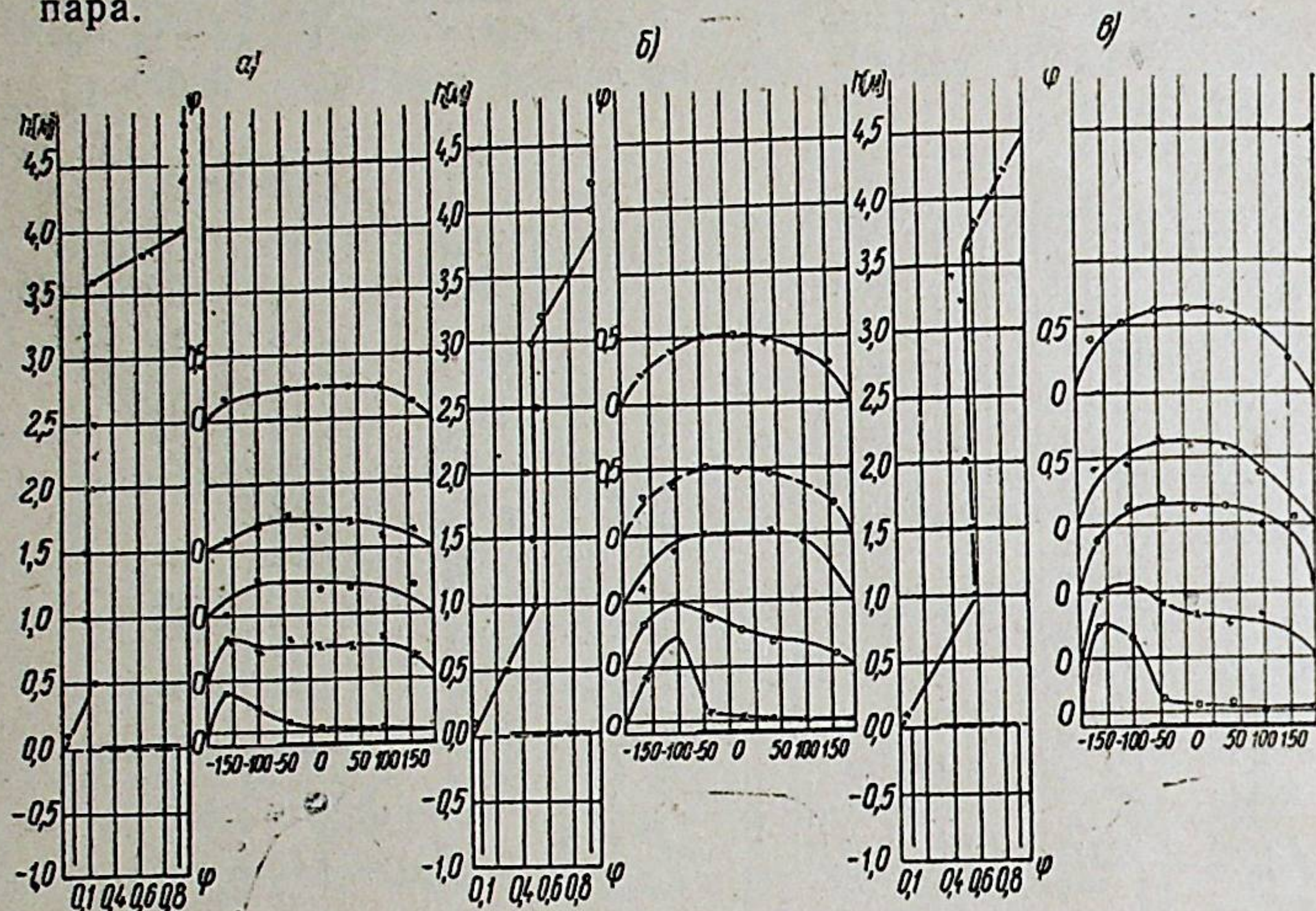


Фиг. 5. Распределение паросодержания по высоте колонки (по оси и хордам) с центральным подводом пара при 33 ата

а)	б)	в)
$D = 1100 \text{ кг/час}$	$D = 3000 \text{ кг/час}$	$D = 4500 \text{ кг/час}$
$h_{\text{вес}} = 3540 \text{ мм}$	$h_{\text{вес}} = 1692 \text{ мм}$	$h_{\text{вес}} = 1426 \text{ мм}$
$R = 704 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{час}$	$R = 1918 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{час}$	$R = 2878 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{час}$
$W_0'' = 0,189 \text{ м/сек}$	$W_0'' = 0,533 \text{ м/сек}$	$W_0'' = 0,799 \text{ м/сек}$

Для дополнительного подтверждения выравнивающего воздействия барботажного слоя, были проведены опыты при боковой подаче пара по сегменту щита. Для этого дырчатый щит перекрывался так, чтобы пар выходил по сегменту. При этом, незакрытая площадь была принята также равной 25% от общего сечения.

Результаты этих опытов, представленные на фиг. 6, также свидетельствуют о выравнивающем воздействии больших слоев жидкости. Зона стабилизации при этом возрастает с увеличением нагрузки и степени неравномерности подвода пара.



Фиг. 6. Распределение паросодержания по высоте колонки (по оси и хордам) с боковым подводом пара при 33 атм

a)	б)	в)
$D=1\ 000\ \text{кг/час}$	$D=3\ 000\ \text{кг/час}$	$D=4\ 500\ \text{кг/час}$
$h_{\text{всс}}=2\ 901\ \text{мм}$	$h_{\text{всс}}=1\ 508\ \text{мм}$	$h_{\text{всс}}=1\ 920\ \text{мм}$
$R=640\ \text{м}^3\text{м}^2/\text{час}$	$R=1\ 918\ \text{м}^3\text{м}^2/\text{час}$	$R=2\ 872\ \text{м}^3\text{м}^2/\text{час}$
$W''_0=0,172\ \text{м/сек}$	$W''_0=0,533\ \text{м/сек}$	$W''_0=0,799\ \text{м/сек}$

Таким образом, опыты по исследованию распределения пара по сечению показали, что в диапазоне проведенных нагрузок (при диаметре колонки 0,35 м) в больших барботажных слоях происходит выравнивание паросодержания. При малых слоях процесс барботажа протекает в зоне стабилизации. Поэтому для равномерного распределения паросодержания по сечению здесь действительно необходимо создать устойчивую паровую подушку под распределительным щитом.

### Определение высоты переходной зоны

Пройденный анализ зависимости высоты переходной зоны от режимных факторов показал, что высоту переходной зоны следует искать как функцию нагрузки и давления (влияние солесодержания воды и диаметра колонки в данном случае не рассматривается).

Результаты наших опытов (проведенных при 17, 20, 33, 41, 45 атм) (фиг. 7) и опытные данные, полученные ранее другими исследователями (фиг. 8), группируются в логарифмических координатах около прямых параллельных линий. Расположение линий определяется давлением, при котором проводились опыты.

Влияние давления можно оценить по графику фиг. 9. Как видно из графика, точки ложатся около прямой линии, а опытные данные настоящего исследования хорошо согласуются с ранее полученными данными. Однако, наши опытные точки располагаются несколько выше точек, которые были получены при опытах с малыми барботажными слоями. Это можно объяснить влиянием колебаний уровня.

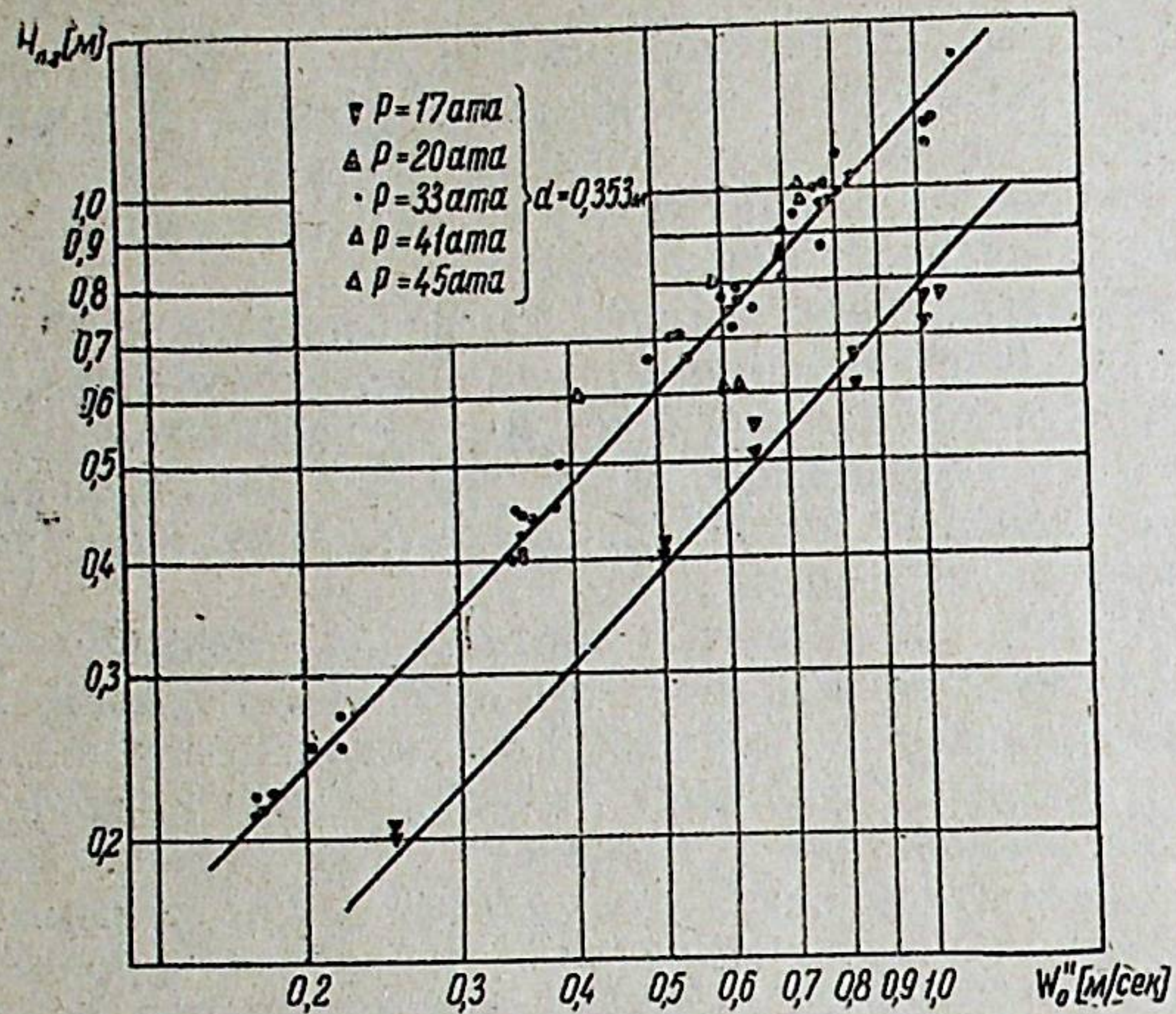
В опытах МоЦКТИ и ЭНИН перегретый пар подавался в колонку через холодильник, снижающий его перегрев до величины температуры, при которой компенсировались тепловые потери в окружающую среду. В наших опытах в колонку подавался насыщенный пар. Чтобы предупредить накопление конденсата, образующегося из-за наличия теплопотерь, часть его непрерывно сбрасывалась в дренаж. Такой способ поддержания уровня вызывает возмущения и более значительные колебания действительного уровня, в связи с чем высота переходной зоны несколько возрастает.

Высота переходной зоны может быть выражена в зависимости от приведенной скорости пара и давления уравнением

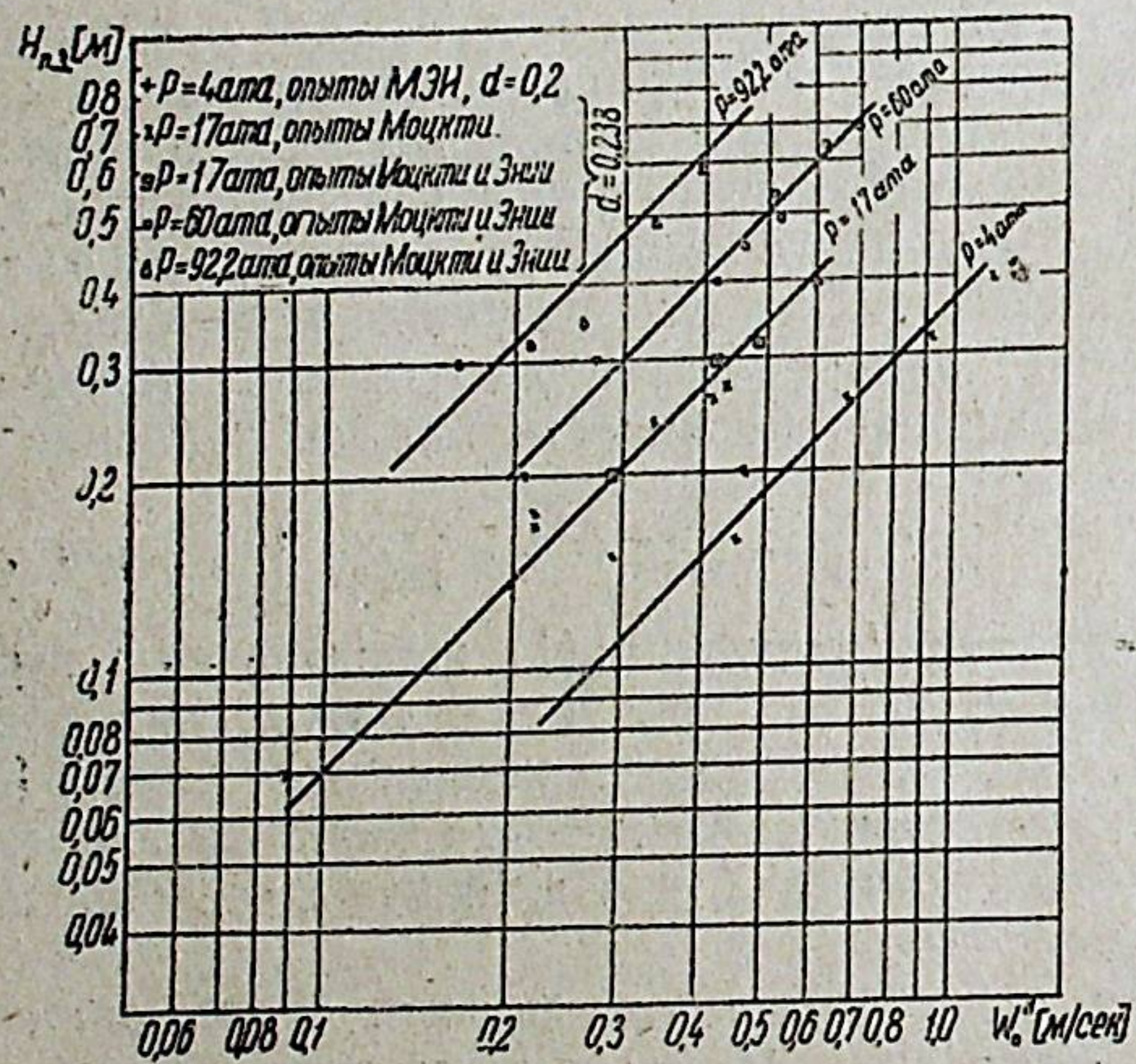
$$H_{пз} = 0,15 P^{0,52} w_0' [м] \quad (1)$$

Для построения формулы (1) использованы экспериментальные данные, полученные на колонках диаметром 0,238 и 0,353 м. Так как при таких значениях диаметр не оказывает заметного влияния на процесс барботажа в стабильной области, можно ожидать, что влияние  $D$  не проявится и в переходной зоне.

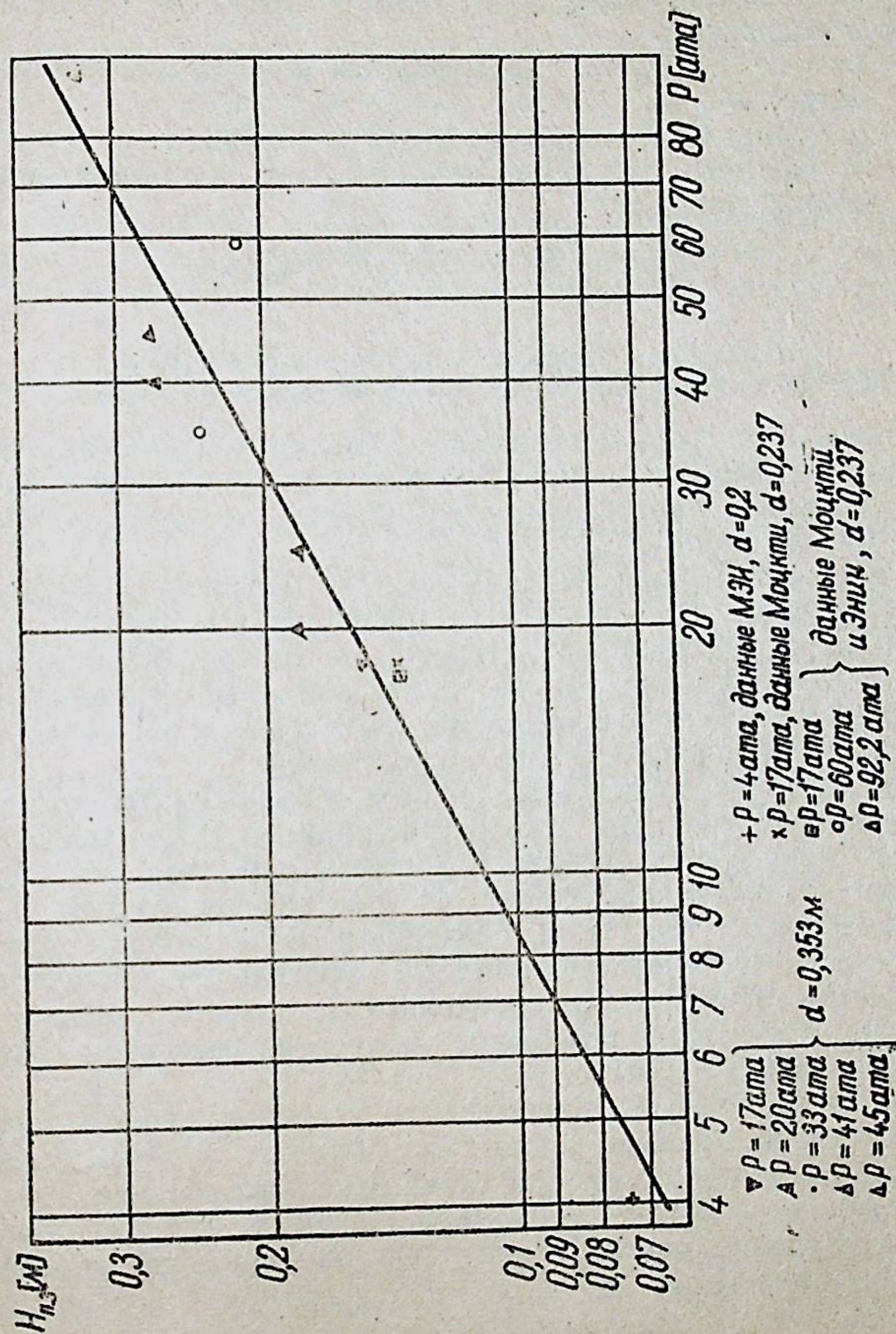
Формула (1) позволяет вычислить положение действительного уровня в аппарате по показаниям весового уровня. Под действительным уровнем здесь и далее понимается рас-



Фиг. 7. Зависимость высоты переходной зоны от приведенной скорости пара при давлении 17—45 ата (по данным МЭИ)



Фиг. 8. Зависимость высоты переходной зоны от приведенной скорости пара при различных давлениях (по данным МОЦКТИ, ЭНИН, МЭИ)



Фиг. 9. Зависимость высоты переходной зоны от давления  $W_0'' = 0,2$  м/сек

стояние от нижнего штуцера дифференциального манометра, измеряющего весовой уровень, до отметки, соответствующей концу переходной зоны.

Если обозначить

$h_{вес}$  — весовой уровень над нижним штуцером дифманометра, м.

$h_0$  — максимальный действительный уровень, т. е. высота от нижнего штуцера дифманометра до конца переходной зоны, м,

$$h_0 = \frac{h_{вес}}{1 - \varphi} + 0,075 P^{0,52} \omega_0'' [м] \quad (2)$$

в) Обобщенная зависимость по определению высоты переходной зоны. Определение истинного уровня в аппарате

Основной гидродинамической характеристикой водяного объема при барботаже пара через жидкость является объемное напорное паросодержание  $\varphi$  (часть сечения, занимаемая паровой фазой).

К настоящему времени в результате большого количества исследований значение  $\varphi$  для той части объема, где напорное паросодержание практически не изменяется в зависимости от погружения, может быть определено с достаточной точностью. В то же время, распределение  $\varphi$  по высоте в поверхностных слоях изучено недостаточно.

Как видно из проведенных опытов, изменение паросодержания в поверхностных слоях происходит по сравнительно сложной зависимости (кривой). Однако, для практики наибольший интерес представляет обычно значение высоты переходного слоя  $H_{п.з.}$ , т. к. значение этой величины дает возможность установить истинный уровень в аппарате. Обобщенные зависимости, определяющие высоту переходной зоны, могут быть построены по проведенным выше экспериментальным данным.

Как показано Л. С. Стерманом в условиях, когда вязкость среды не оказывает заметного влияния на гидродинамические характеристики при барботаже (при сильно турбулизированном потоке), объемное напорное паросодержание  $\varphi$  или любой другой неопределяющий критерий определяется из выражения

$$N = f \left( Fr, \frac{\gamma''}{\gamma' - \gamma''}, \frac{V \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma' - \gamma''}}}{D} \right) \quad (3)$$

На основании этого можно установить обобщенную зависимость, определяющую высоту переходной зоны и положение действительного уровня в аппарате.

$$\frac{H_{п.з.}}{V \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma' - \gamma''}}} = f \left( Fr, \frac{\gamma''}{\gamma' - \gamma''}, \frac{V \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma' - \gamma''}}}{D} \right) \quad (4)$$

Критериальная обработка данных, полученных в настоящей работе и в исследованиях, проведенных ранее в МЭИ, МоЦКТИ и ЭНИН показывает, что между отноше-

нием  $\frac{H_{п.з.}}{V \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma' - \gamma''}}}$  и критериями  $Fr, \frac{\gamma''}{\gamma' - \gamma''}$  существует однозначная связь.

Однако в опытных данных настоящего исследования абсолютные значения  $H_{п.з.}$  при условиях, близких к тем, которые имели место в исследованиях МоЦКТИ, заметно выше. Как уже упоминалось вероятно это связано с тем, что при проведении опытов здесь могли иметь место более заметные колебания уровня, в связи с тем переходная область как бы растягивалась. В то же время, в исследованиях, проведенных в МоЦКТИ, уровень мог длительно поддерживаться постоянным, так как к установке подводился перегретый пар, температура которого могла регулироваться и поддерживаться на требуемом уровне достаточно точно.

Обработка имеющихся экспериментальных данных по критериальной системе (4) приводит к зависимости

$$\frac{H_{п.з.}}{V \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma' - \gamma''}}} = C \cdot \left( Fr \frac{\gamma''}{\gamma' - \gamma''} \right)^{1/2} \left( \frac{V \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma' - \gamma''}}}{D} \right)^{1/4} \quad (5)$$

где  $C$  по опытным данным МоЦКТИ и ЭНИН принимает значение  $1,4 \cdot 10^3$ , а по данным настоящей работы —  $2,2 \cdot 10^3$ .

Как известно, влияние диаметра проявляется только при относительно небольших значениях  $D$ , когда, как это показано Л. С. Стерманом,

$$D \leq D_{пр} = 260 \left( \frac{\gamma''}{\gamma' - \gamma''} \right)^{0,2} V \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma' - \gamma''}} \quad (6)$$



Поэтому, при  $D > D_{пр}$  в формулу (5) следует вводить величину  $D_{пр}$ , рассчитанную по уравнению (6).

Хотя в практических условиях, так же как и в наших исследованиях могут иметь место заметные колебания уровня, в расчетах, по нашему мнению, следует пользоваться формулой (5) при значении коэффициента  $C$ , равном  $1,4 \cdot 10^3$ . Однако уровень пароводяной смеси необходимо определять, при этом, по его наибольшей возможной высоте.

Так, если весовой уровень поддерживается равным  $h_{вес}$  от нижнего штуцера водомерного прибора и при этом колебания уровня находятся в пределах  $\pm \Delta h_{вес}$ , то действительный максимальный уровень в аппарате определится

$$H_{д\max} = \frac{h_{вес} + \Delta h_{вес}}{1 - \varphi} + \frac{1}{2} N_{пз} \quad (7)$$

Где  $\varphi$  — объемное напорное паросодержание в слоях достаточно отдаленных от поверхностных (в которых оно не изменяется в зависимости от погружения), а  $N_{пз}$  определяется по формуле (5) при  $C = 1,4 \cdot 10^3$ .

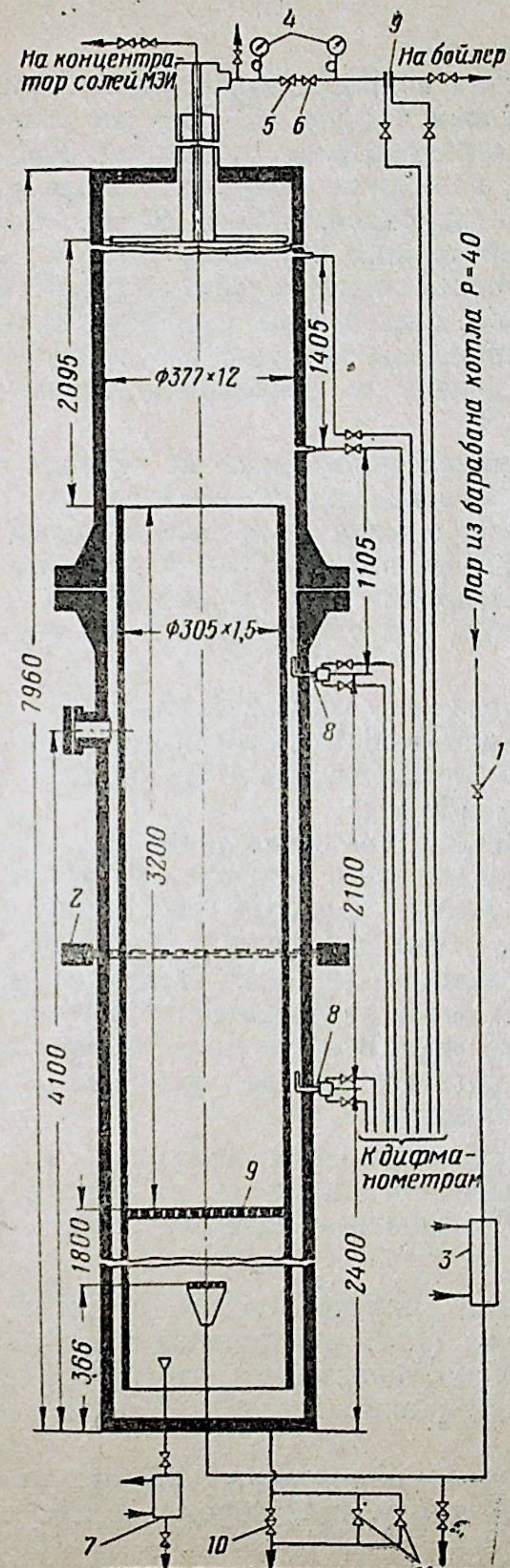
#### 4. Исследование работы опускного участка

Для организации естественной циркуляции в аппаратах кипящего типа создается циркуляционный контур и большой барботажный слой над активной зоной. Циркуляция возникает благодаря разности удельных весов воды в подъемном и опускном участках циркуляционного контура.

При наличии циркуляции условия барботажа изменяются. Паросодержание барботажного слоя (которое определяет удельный вес пароводяной смеси на подъемном участке контура) зависит от количества воды, поднимающегося вместе с паром, т. е. от кратности циркуляции контура. Кратность циркуляции, в свою очередь, зависит от паросодержания подъемного участка.

В опускном токе возможен захват пара водой. Это также отражается на кратности циркуляции и значениях паросодержания в подъемном потоке. Таким образом, все эти процессы тесно связаны между собой.

Влияние кратности циркуляции (в условиях, характерных для рассматриваемых аппаратов) на паросодержание, а также явления, определяющие захват пара, до сего времени не изучены. Более того, вопрос о возможности захвата опускным потоком значительных количеств пара является спорным.



Фиг. 10. Схема сепарационной колонки с установкой обечайки для организации циркуляции жидкости. 1 — регулировочный вентиль подводящего паропровода; 2 — просвечивающее устройство; 3 — холодильник; 4 — обрывовые манометры; 5 — запорный вентиль на сбросном паропроводе; 6 — регулировочный вентиль на сбросном паропроводе; 7 — отбор пробы воды; 8 — трубки Пито; 9 — погруженный дырчатый щит; 10 — дренажные вентили; 11 — обводные игольчатые вентили; 12 — нормальная диафрагма.

Для изучения этих вопросов экспериментальная установка была переоборудована (фиг. 10). Внутри колонки концентрично установлена обечайка диаметром  $305 \times 1,5$  мм с открытым верхним и нижним концами. Кольцевой зазор между обечайкой и колонкой, равный 24 мм, предназначен для создания направленного опускного тока воды при барботаже пара. В верхней части кольцевой зазор может перекрываться кольцом. Для замера скоростей опускных токов воды в зазоре установлены трубки Пито, импульсные линии от которых присоединены к дифференциальным манометрам.

Для оценки влияния циркуляции на процесс барботажа при наличии опускного контура проводилось две серии опытов. В одной серии кольцевой зазор был перекрыт и организованная циркуляция не имела места; в другой серии зазор был открыт. Сопоставление данных, полученных в первой и второй сериях опытов, позволяют оценить влияние циркуляции.

Все опыты проводились при давлении 33 ата. При проведении опытов с открытым кольцевым зазором захват пара в зазор определяется просвечиванием по хордам, отстоящим от оси колонки на  $\pm 160$  мм.

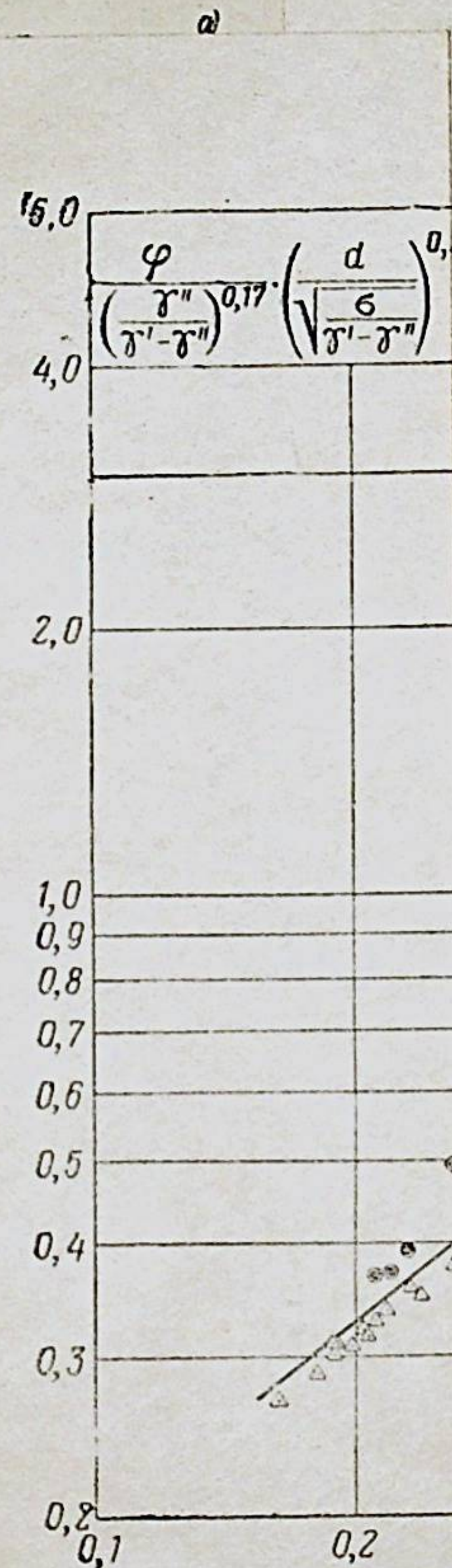
Как показали опыты при просвечивании кольцевого зазора, по всей высоте обечайки в зазоре имеется пар.

Точность определения паросодержания при просвечивании по хордам ниже, чем при просвечивании по диаметру, так как при этом толщина металла увеличивается, а ход луча в пароводяной смеси уменьшается. Поэтому, для более точного определения паросодержания в зазоре были проведены замеры, при которых источник устанавливался внутри кольцевого зазора колонки.

Результаты определения паросодержания в кольцевом зазоре этим методом представлены на фиг. 11. Из фигуры видно, что с повышением нагрузки захват пара возрастает.

Сравнение данных, полученных при открытом и закрытом кольцевом зазоре (т. е. при наличии и отсутствии организованной циркуляции) показывает, что паросодержание на стабильном участке и высота переходной зоны в обоих случаях одни и те же.

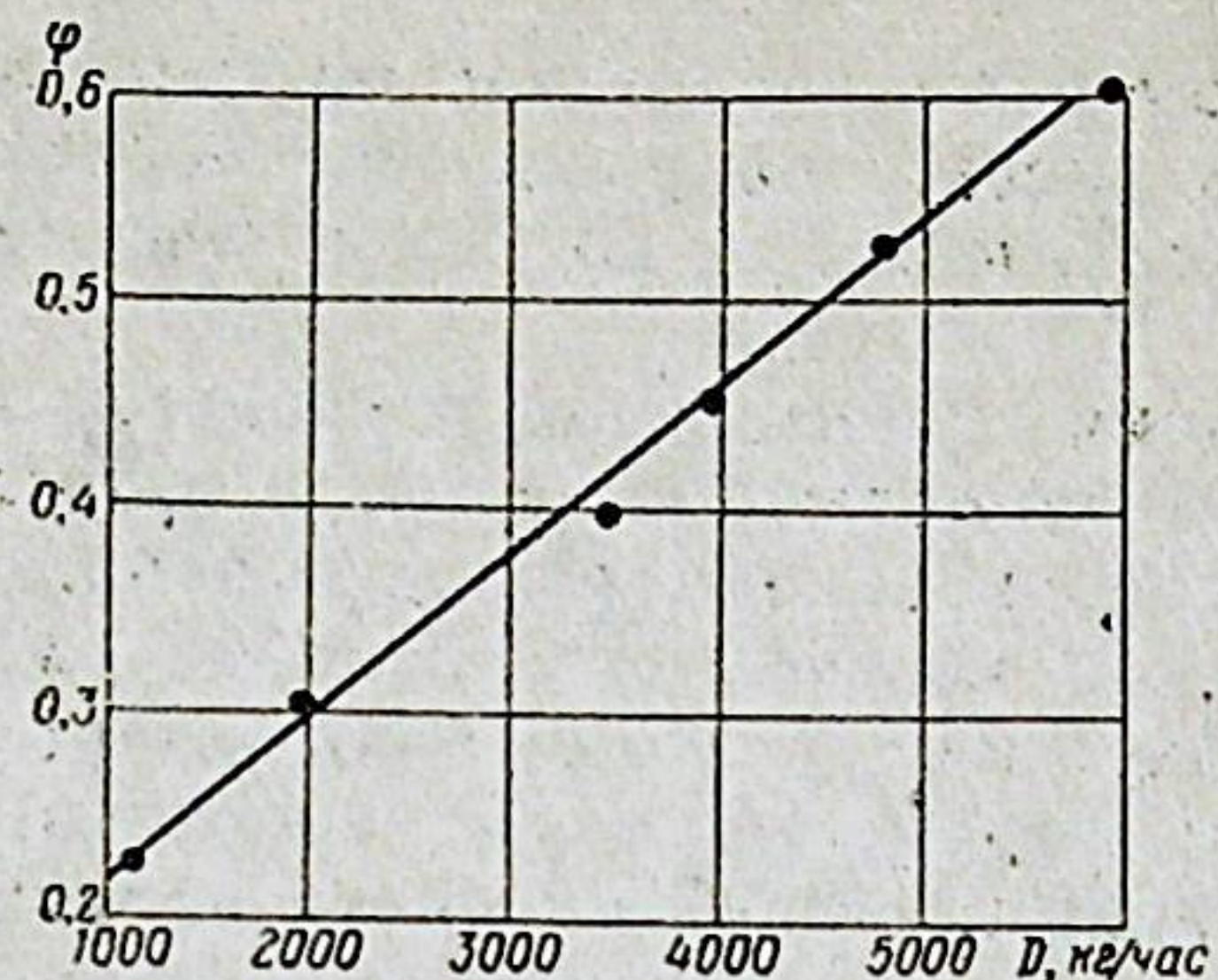
Замеренные значения паросодержаний, при этом, в условиях организованной циркуляции хорошо согласуются также



Фиг. 4. Зависимость ср  
+ — данные авт

с величинами, рассчитанными по формулам Стюшина и Локшина и Шварца\*.

Из этого можно заключить, что возникающая в процессе барботажа при организованном опускном движении среды циркуляция влияет на паросодержание барботажного слоя незначительно. Так для приведенной скорости пара  $w_0'' =$



Фиг. 11. Паросодержание в кольцевом зазоре в зависимости от нагрузки

$= 0,24$  м/сек. расчетные значения находятся в пределах разброса опытных данных при кратностях циркуляции от 0 до 40, а для  $w_0'' = 1,0$  м/сек — при кратностях от 0 до 10. Большие кратности при  $w_0'' = 1,0$  в опытах не имели места. Таким образом, для режимов, охваченных данными исследованиями, наличие опускного тока хотя и влияет на изменение паросодержания, но изменение  $\varphi$  при этом лежит в пределах разброса опытных данных.

### Выводы

1. Процесс барботажа при больших водяных слоях практически не отличается от наблюдавшегося многими исследователями процесса в малых барботажных слоях. Здесь также существует стабильная зона, в которой паросодержание не изменяется по высоте, и переходная зона, где происходит

\* Расчет по нормам ЦКТИ приводит к несколько более низким величинам паросодержания. Однако при определении по нормам ЦКТИ в пройденных интервалах кратностей циркуляции эти номограммы приходится экстраполировать за пределы экспериментальных данных, по которым они строились.

увеличение паросодержания от значений, характерных для стабильной зоны, к значениям  $\varphi=1$ .

2. Величина паросодержания на стабильном участке определяется нагрузкой и давлением и не зависит от высоты весового уровня; высота переходной зоны также зависит от нагрузки и давления и не зависит от высоты стабильного участка.

3. При равномерном распределении пара во входном сечении барботера достаточно равномерное распределение пара по сечению сохраняется по всей высоте стабильного участка.

4. При создании значительной неравномерности в подаче пара по сечению барботажного слоя, в вышестоящих слоях наблюдается выравнивание паросодержания. Участок барботажного слоя, на котором достигается сравнительно полное выравнивание (зона стабилизации), зависит от степени неравномерности подвода пара и от нагрузки.

5. Предложенная обобщенная критериальная зависимость дает возможность определить высоту переходной зоны при различных режимах.

Зависимость действительна как при больших, так и при малых барботажных слоях.

6. При наличии циркуляционного контура имеет место захват пара в опускной участок, величина которого возрастает с увеличением нагрузки.

7. Сопоставление опытных данных при наличии опускного участка и без него показало, что при исследованных режимах опускное движение жидкости оказывает незначительное влияние на барботажный процесс.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1) Исследование гидродинамики барботажного слоя при больших высотах пароводяной смеси. Журнал НДВШ № 2, 1959 г.

2) Исследование гидродинамики водяного объема в условиях больших высот барботажного слоя. Журнал НДВШ № 2, 1959 г.

3) К определению истинного уровня при барботаже пара через жидкость. Журнал Теплоэнергетика № 1, 1960 г.