

6  
А-31

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ

Б.К.СТРИГИН

На правах рукописи

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕП. ОБМЕНА В  
ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБАХ ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ  
ВЫНУЖДЕННОЙ И СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

(053 - теплофизика)

Автореферат диссертации на соискание учёной  
степени кандидата технических наук

Москва

1969

## В В Е Д Е Н И Е

Для многих областей техники большой интерес представляет течение и теплообмен в трубах при наложении на вынужденный поток жидкости свободной конвекции, возникающей вследствие неоднородного распределения плотности по сечению трубы. Взаимодействие свободной конвекции с вынужденным течением приводит к существенному изменению профилей скорости и температуры, а следовательно, коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления по сравнению с чисто вынужденным течением.

Особенно важным является тот факт, что в зависимости от конкретных условий может наблюдаться как существенное повышение, так и понижение теплоотдачи по сравнению с чисто вынужденным течением при тех же условиях. Учет этих явлений позволит значительно повысить точность расчета и избежать ошибок при проектировании теплообменных устройств.

При совместном действии вынужденной и свободной конвекции в трубах могут наблюдаться два режима течения: вязкостно-гравитационный и вязкостно-инерционно-гравитационный. При течении жидкости в вертикальных трубах каждому из этих режимов соответствуют два случая взаимодействия вынужденной и свободной конвекции: течение снизу вверх при нагревании жидкости или сверху вниз при охлаждении и течение снизу вверх при охлаждении или сверху вниз при нагревании. В первом случае направления вынужденной и свободной конвекции у стенки совпадают, а во втором — противоположны.

В настоящее время имеется значительное число работ, в которых исследована теплоотдача при течении в вертикальных трубах

344566

Центральная научная  
Библиотека  
Академии наук Киргизской ССР

с постоянной температурой стенки как в случае совпадения, так и в случае противоположного направления вынужденной и свободной конвекции у стенки.

Исследование теплоотдачи при постоянной плотности теплового потока на стенке проведено лишь для случая гидродинамически и термически стабилизированного вязкостно-гравитационного течения при сравнительно небольших числах Рэлея. Данные о местной теплоотдаче в гидродинамическом и термическом начальных участках отсутствуют. Практически не исследован вопрос о теплообмене при вязкостно-инерционно-гравитационном течении. С целью изучения этих вопросов проведено экспериментальное исследование местной теплоотдачи при вязкостно-гравитационном и вязкостно-инерционно-гравитационном течении воды в вертикальных трубах в случае нагревания жидкости при постоянной плотности теплового потока на стенке как при подъёмном, так и при опускном движении.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Аналитическое решение задачи для стабилизированного вязкостно-гравитационного течения жидкости в вертикальных трубах при  $q_c = const$  было получено Г.А.Остроумовым (при отсутствии в потоке внутренних источников тепла). Т.М. Холлмен распространил это решение на случай равномерно распределенных в потоке внутренних источников тепла. Аналогичные решения были получены и другими авторами. В основе этих решений лежит предположение о том, что физические свойства жидкости, кроме плотности, постоянны. Зависимость плотности от температуры считается линейной и учитывается только в гравитационном члене уравнения движения.

Экспериментальные данные по местной теплоотдаче при стабилизированном вязкостно-гравитационном течении для  $q_c = const$ , полученные Холлменом и Брауном, находятся в согласии с результатами теоретического расчёта. В этих работах, а также в работах Скили с сотрудниками и Лоуренса и Чато получены некоторые экспериментальные данные по нарушению устойчивости вязкостно-гравитационного течения.

Вопрос о движении жидкости и теплообмене при вязкостно-инерционно-гравитационном течении весьма мало исследован. Некоторые теоретические результаты для этого случая приводят Л.Э. Бэр и Ожалво с сотрудниками. Основная проблема, возникающая при решении этой задачи, состоит в определении коэффициентов турбулентного обмена импульса ( $\epsilon_\tau$ ) и тепла ( $\epsilon_q$ ) в условиях взаимодействия вынужденной и свободной конвекции.

Л.Э. Бэр определял  $\epsilon_\tau$  по Рейхардту с последующим введением поправки, учитывающей влияние свободной конвекции. Величина этой поправки была оценена весьма приближенно, опираясь на опытные данные по теплоотдаче, полученные Эккертом, при  $t_c = const$ . Отсюда ясно, что результаты, полученные Л.Э. Бэр, носят оценочный характер и нуждаются в проверке путем сравнения с опытными данными.

В работе Ожалво решение проведено численным методом с использованием ЭЦВМ. Коэффициенты турбулентного обмена определялись по соотношениям, полученным Джексоном и Ликодисом для чисто вынужденного турбулентного течения. Полученные данные по теплоотдаче при вязкостно-инерционно-гравитационном течении практически не отличаются от полученных в той же работе

данных для чисто вынужденного турбулентного течения. Этот результат вызывает некоторые сомнения, и, как будет видно из дальнейшего, не подтверждается нашими данными.

Из приведенного краткого обзора видно, что задача о теплообмене в вертикальных трубах при совместном действии вынужденной и свободной конвекции для случая  $q_c = const$  исследована весьма неполно.

#### Метод исследования и экспериментальная установка

Измерение местной теплоотдачи проводилось при вязкостно-гравитационном и вязкостно-инерционно-гравитационном течении воды в вертикальных трубах при подъёмном и опускном движении жидкости и постоянной плотности теплового потока на стенке. Для этой цели была создана экспериментальная установка, включающая циркуляционный контур с напорным баком, опытный участок, систему электропитания и соответствующую систему измерений.

Опыты проводились на трёх опытных участках, основные данные для которых приведены в таблице. В конструктивном отношении участки одинаковы. Они отличаются только размерами и наличием или отсутствием на входе изотермического успокоительного участка. Для изготовления опытных участков применялись специально отобранные и проверенные тонкостенные трубы из нержавеющей стали IX18N9T.

Обогрев участка осуществлялся путем непосредственного пропускания переменного электрического тока по его стенке. Для подвода тока на концах обогреваемого участка припаяны медные шины, температура которых с помощью электронагрева-

телей и холодильников поддерживалась такой, чтобы тепловой поток через шины отсутствовал.

На наружной поверхности обогреваемого участка для измерения распределения температуры стенки приварены медно-константановые термопары. Э.д.с. термопар измерялась потенциометром ПМС-48.

Измерение тепловых потерь через изоляцию на опытном участке №1 производилось с помощью тепломеров, вмонтированных в изоляцию. На участках №2 и №3 потери определялись по результатам тарировки в зависимости от разности температур между стенкой в данном сечении участка и окружающей средой.

На выходе из опытного участка имеется смеситель, после которого осуществляется измерение среднemasсовой температуры жидкости, выходящей из опытного участка.

На концах обогреваемого участка имеются отборы давления. Перепад давлений измерялся П-образным дифференциальным манометром. Импульсные линии были термостатированы, чтобы избежать погрешностей, связанных с изменением плотности жидкости в соединительных трубках. Отсчёт уровня жидкости в манометре производился катетометром КМ-6.

Вода в опытный участок подается из напорного бака с постоянным уровнем. После выхода из опытного участка нагретая вода охлаждается в теплообменнике и попадает в регулирующий бак. Последний с помощью электропривода можно перемещать по высоте и тем самым регулировать расход жидкости через опытный участок. Из регулирующего бака вода сливается в сборный бак, в котором имеется система электронагревателей и резиновый

холодильник, которые служат для регулирования температуры воды. С помощью электронного моста МСР-01, управляющего включением одного из нагревателей, температура воды поддерживается автоматически на заданном уровне. Из сборного бака вода центробежным насосом подается в напорный бак, а излишек воды через перелив возвращается в сборный бак. Расход воды через рабочий участок измерялся весовым методом.

При больших расходах жидкости для получения достаточного напора на входе в опытный участок применялась система поддавливания, с помощью которой газовое пространство над уровнем жидкости в герметически закрытом напорном баке можно держать под избыточным давлением. Система поддавливания включает газгольдер, который служит для обеспечения постоянства избыточного давления, а также разделительный герметизирующий бачок на линии перелива. Уровень жидкости в разделительном бачке поддерживается постоянным при помощи поплавкового клапана. Газгольдер по мере надобности заполняется азотом из баллона через редуктор.

Для поддержания чистоты внутри контура все его элементы были выполнены из стали IX13N9T, а дистиллированная вода периодически заменялась свежей.

Электропитание обогреваемого участка осуществлялось от понижающих трансформаторов ОСУ-20 и ОСУ-40, схема включения которых выбиралась в соответствии с необходимым напряжением питания. Мощность, выделяемая на обогреваемом участке, регулировалась с помощью автотрансформатора АОМК-75, а определялась по силе тока и сопротивлению участка. Сила тока измерялась

амперметром Д-57 класса 0,1 с трансформатором тока И-56 класса 0,1.

В процессе наладки установки были протарированы потери через изоляцию опытных участков и измерено их электрическое сопротивление в зависимости от температуры.

Для проверки работы установки были проведены измерения гидравлического сопротивления при турбулентном изотермическом течении воды. Отклонение полученных данных от закона Блазиуса не превышало  $\pm 2\%$ . На участке №1 были также проведены тарировочные опыты по теплоотдаче при вынужденном турбулентном течении. Числа Нуссельта, полученные при  $x/d > 40$ , числе  $Re$  от  $10^4$  до  $1,4 \cdot 10^4$  и числе  $Ra_d$ , равном  $300 \pm 500$ , с точностью  $\pm 5\%$  совпадали со значениями, рассчитанными по формуле МЭИ.

При проведении экспериментов на каждом опытном участке были проделаны по две серии опытов - при подъёмном и при опускном течении. В каждом опыте проводилась тщательная компенсация потерь тепла через токоподводящие шины, а также контроль баланса электрической и тепловой мощности с учетом тепловых потерь через изоляцию опытного участка. Величина потерь в самом неблагоприятном случае не превышала 6% от полного тепловыделения в стенке. Как правило, тепловой баланс сходился с точностью 2-3%. Однако, в небольшом числе опытов, когда число  $Re$  и подогрев воды в рабочем участке были малы, расхождение достигало 10%. Это расхождение в основном связано с погрешностью, вносимой при измерении среднemasсовой температуры жидкости на выходе вследствие недостаточно хорошего перемешивания жидкости.

Поэтому при обработке данных средняя массовая температура воды в любом сечении рабочего участка рассчитывалась по температуре на входе и подогреву воды за счёт электрической мощности, подведенной на участке от входа до данного сечения с учётом тепловых потерь на этом участке.

Температура на внутренней поверхности стенки рассчитывалась по измеренной температуре наружной поверхности стенки путем введения расчётной поправки на перепад температур в стенке с учётом тепловыделения в ней. Максимальная величина этой поправки составляла 0,8°C.

Все физические свойства жидкости, необходимые для расчётов, определялись по среднемассовой температуре жидкости в данном сечении.

Результаты исследования теплоотдачи и устойчивости потока при вязкостно-гравитационном течении.

Как показывает анализ методом подобия, при стационарном вязкостно-гравитационном течении жидкости с постоянными, кроме плотности, физическими свойствами число Нуссельта зависит от следующих безразмерных величин:

$$Nu = Nu(x/d, Pe, Re, Ra_A) \quad (I)$$

где  $Nu = \frac{dd}{\lambda}$      $Pe = \frac{\bar{w}d}{\alpha}$      $Re = \frac{\bar{w}d}{\nu}$      $Ra_A = \frac{g\beta z^4 A}{\nu\alpha}$

$d$  - коэффициент теплоотдачи,  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности,  $d = 2r$  - внутренний диаметр трубы,  $\bar{w}$  - средняя скорость жидкости,  $\alpha$  - коэффициент температуропроводности,

$\nu$  - кинематическая вязкость,  $g$  - ускорение силы тяжести,  $\beta$  - коэффициент объёмного расширения,  $A = \frac{\partial t_m}{\partial x}$  - аксиальный градиент температуры жидкости,  $x$  - расстояние от начала обогрева.

При анализе опытных данных было принято, что  $x/d$ ,  $Pe$  и  $Re$  входят в уравнение (I) в виде  $X = \frac{1}{Pe} \cdot \frac{x}{d}$  и  $X' = \frac{1}{Re} \cdot \frac{x}{d}$ . Обобщение опытных данных проводилось в виде:

$$Nu/Nu_l = F(Ra_A, X) \quad (2)$$

где  $Nu_l(X, X')$  - число Нуссельта при ламинарном чисто вынужденном течении жидкости с постоянными физическими свойствами при  $q_c = const$ , которое рассчитывается по известным теоретическим формулам в зависимости от приведенной длины  $X = \frac{1}{Pe} \cdot \frac{x}{d}$ , если профиль скорости на входе в трубу параболический, и в зависимости от  $X$  и  $X' = \frac{1}{Re} \cdot \frac{x}{d}$  при равномерном профиле скорости на входе.

Данные по местной теплоотдаче в области вязкостно-гравитационного течения при совпадении по направлению вынужденной и свободной конвекции у стенки были получены в интервале чисел  $Re$  от 250 до  $Re_{cr}$  при значениях чисел  $Ra_A$  от 250 до  $6 \cdot 10^3$  на опытном участке №1 и от  $3 \cdot 10^3$  до  $8 \cdot 10^5$  на участках №2 и №3. Зависимость для местной теплоотдачи в этом случае описывается уравнением:

$$\frac{Nu}{Nu_l} = \left(1 + \frac{Ra_A}{B}\right)^{0,27} \quad (3)$$

где

$$\left. \begin{aligned} B &= 1,35/X + 78 X^{0,25} && \text{при } X < 0,07 \\ B &= 60 && \text{при } X \geq 0,07 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Отклонение большинства опытных данных от уравнения (5) не превышает  $\pm 8\%$ . Уравнения (3) и (4) справедливы при значениях  $250 \leq Ra_A \leq 8 \cdot 10^5$ ,  $250 \leq Re_{вх} < 2300$ ,  $3 \cdot 10^{-4} \leq X \leq X_{кр}$  и  $2 \leq Pr \leq 6$ .

В случае гидродинамической и термической стабилизации уравнение (3), если по длине единицей по сравнению с (т.е. при достаточно больших числах  $Ra_A$ ) переходит в уравнение Холлмена:

$$Nu = 1,45 \cdot Ra_A^{0,27} \quad (5)$$

Граница применимости уравнения (3) при больших  $X$  определяется пределом устойчивости вязкостно-гравитационного течения. В данной работе была получена зависимость критического значения приведенной длины  $X_{кр} = \frac{1}{Re} \left( \frac{x}{d} \right)_{кр}$ , от числа  $Ra_A$ . Значения  $(x/d)_{кр}$  определялись по координатам тех измерительных сечений опытного участка, в которых показания термомпар были стабильны, в то время как в следующих сечениях наблюдались пульсации температуры стенки, свидетельствующие о начале перехода к вязкостно-инерционно-гравитационному течению. С увеличением  $Ra_A$  значение  $X_{кр}$  уменьшается, причём эта зависимость является однозначной, если имеется предвключенный успокоительный участок. При отсутствии успокоительного

участка и плавном входе в обогреваемый участок  $X_{кр}$  зависит от  $Ra_A$  и от  $Re$ .

Опытные данные, характеризующие предел устойчивости вязкостно-гравитационного течения в случае совпадения по направлению вынужденной и свободной конвекции у стенки обобщены с помощью уравнения:

$$X_{кр} = 4,25 \cdot c \cdot Ra_A^{-0,8} \quad (6)$$

где  $c = 1$  при наличии предвключенного участка  
 $c = 1 + \exp(-0,0025 \cdot Re)$  при отсутствии предвключенного участка } (7)

Уравнения (6) и (7) справедливы при значениях  $600 \leq Ra_A \leq 8 \cdot 10^5$ ,  $250 \leq Re_{вх} < 2300$  и  $2 \leq Pr \leq 6$ .

Вязкостно-гравитационное течение при противоположном направлении вынужденной и свободной конвекции у стенки может существовать, по наблюдениям Холлмена и Брауна, только в очень узком диапазоне чисел  $Ra_A$ . В случае гидродинамической и термической стабилизации, по данным Брауна, уже при  $Ra_A \geq 168$  происходит нарушение устойчивости вязкостно-гравитационного течения вследствие появления обратных токов у стенки. Эти наблюдения подтверждены также и нашими опытами.

В данной работе опытные данные по вязкостно-гравитационному течению при противоположном направлении вынужденной и свободной конвекции были получены в области  $200 \leq Ra_A \leq 450$ ,  $500 \leq Re_{вх} < 2300$ ,  $2 \cdot 10^{-4} \leq X \leq 7 \cdot 10^{-3}$  и  $2 \leq Pr \leq 6$  на опытном участке №1. При этом вязкостно-гравитационное течение наблюдалось лишь в первых трёх-четырёх измерительных сечениях опытного участка, в пределах начального термического участка. В последующих сечениях трубы наблюдались неустойчивое

течение, характеризующееся нерегулярными изменениями температуры стенки в больших пределах.

Полученные данные по местной теплоотдаче в интервале чисел  $Ra_A$ ,  $Re$ ,  $X$  и  $Pz$ , указанных выше, описываются уравнением:

$$Nu/Nu_A = (1 + 80 X)^{-1/2} \quad (8)$$

Зависимость от числа  $Ra_A$  здесь выяснить не представляется возможным, так как интервал его изменения чрезвычайно узок, а число  $Nu$  меняется при этом незначительно.

Результаты исследования теплоотдачи и сопротивления трения при вязкостно-инерционно-гравитационном течении.

Анализ с помощью метода подобия задачи о теплообмене при стабилизированном вязкостно-инерционно-гравитационном течении жидкости с постоянными, кроме плотности, физическими свойствами в вертикальной трубе показывает, что число  $Nu$  в этих условиях зависит от следующих величин:

$$Nu = Nu(Re, Pz, Gr) \quad (9)$$

Обработка опытных данных по местной теплоотдаче, полученных при вязкостно-инерционно-гравитационном течении, проводилась в виде:

$$Nu/Nu_T = F(Re, Pz, Gr) \quad (10)$$

Где  $Nu_T$  - число Нуссельта, рассчитанное для турбулентного течения жидкости с постоянными физическими свойствами по формуле ИЭИ:

$$Nu_T = \frac{(5/8) Re Pz}{1,07 + 12,7 \sqrt{5/8} (Pz^{2/3} - 1)} \quad (11)$$

При анализе опытных данных по местной теплоотдаче для случая совпадения по направлению вынужденной и свободной конвекции у стенки было найдено, что они удовлетворительно обобщаются в системе координат  $Nu/Nu_T$ ,  $Ra_A/Re^2$ . Здесь при  $Ra_A/Re^2 < 4 \cdot 10^{-6}$   $Nu/Nu_T = 1$ , т.е. имеет место вязкостно-инерционное течение. При  $Ra_A/Re^2 > 4 \cdot 10^{-6}$  наблюдается переход к вязкостно-инерционно-гравитационному течению, в процессе которого значение  $Nu/Nu_T$  уменьшается. Характер изменения  $Nu/Nu_T$  в области перехода оказался различным при наличии и отсутствии предвключенного успокоительного участка. В первом случае величина  $Nu/Nu_T$  уменьшается до 0,5 при  $Ra_A/Re^2 = 10^{-4}$ , а во втором - до 0,7 при значении  $Ra_A/Re^2 = 3 \cdot 10^{-4}$ . При дальнейшем увеличении  $Ra_A/Re^2$  наблюдается вязкостно-инерционно-гравитационное течение, при котором  $Nu/Nu_T$  растет с ростом  $Ra_A/Re^2$ .

Экспериментальные данные для области перехода от вязкостно-инерционного к вязкостно-инерционно-гравитационному течению описываются следующим уравнением:

$$\frac{Nu}{Nu_T} = \left(1 - \varnothing \frac{Ra_A}{Re^2}\right)^{-1} \quad (12)$$

Где  $\varnothing = 1,15 \cdot 10^4$  при наличии успокоительного участка и значениях  $4 \cdot 10^{-6} < Ra_A/Re^2 < 10^{-4}$   
 $\varnothing = 1,5 \cdot 10^3$  при отсутствии успокоительного участка и значениях  $4 \cdot 10^{-6} < Ra_A/Re^2 < 3 \cdot 10^{-4}$  } (13)

Экспериментальные данные для области развитого вязкостно-инерционно-гравитационного течения описываются уравнением:

$$\frac{Nu}{Nu_T} = 10 \left(\frac{Ra_A}{Re^2}\right)^{1/3} \quad (14)$$



Уравнение (14) справедливо при значениях  $10^{-4} < Ra_A / Re^2 < 1$  при наличии успокоительного участка и  $3 \cdot 10^{-4} < Ra_A / Re^2 < 1$  при его отсутствии.

Опытные данные, на основе которых найдены уравнения (12) и (14), получены на опытных участках №1 и №2 при  $x/d \geq 40$ , где изменение числа  $Nu$  по длине становится незначительным, и при  $300 \leq Re \leq 3 \cdot 10^4$ ,  $300 \leq Ra_A \leq 5 \cdot 10^5$  и  $2 \leq Pr \leq 6$ .

Следует заметить, что отмеченное выше существенное уменьшение числа  $Nu$  при значении  $Ra_A / Re^2 = 10^{-4}$  по сравнению с турбулентным течением в тех же условиях качественно согласуется с результатами расчёта Л.Э.Бэра и обязательно должно учитываться при расчёте теплообменной аппаратуры. При значениях  $Ra_A / Re^2 > 10^{-3}$   $Nu / Nu_T$  становится больше единицы, что также имеет большое практическое значение, особенно при малых числах  $Re$ , когда влияние свободной конвекции приводит к переходу вязкостно-гравитационного течения к вязкостно-инерционно-гравитационному с соответствующим увеличением числа  $Nu$ .

В этой связи необходимо пояснить, что при вычислении величины  $Nu / Nu_T$  даже при низких значениях числа  $Re$  было принято значение  $Nu_T$ , рассчитанное по формуле МЭИ для турбулентного течения (II) (значение  $\xi$  рассчитывалось по формуле Филоненко). Поэтому величина  $Nu_T$  при малых числах  $Re$  является в известном смысле условной величиной, удобной для обобщения данных в единой форме.

Сравнение наших данных с результатами расчёта Сжалво показывает, что этот расчёт проведен для значений  $Ra_A / Re^2 < 3 \cdot 10^{-5}$ .

При этом по нашим данным величина  $Nu / Nu_T$  изменяется от 1 до 0,75, а по данным расчёта  $Nu / Nu_T = 1$ . Повидимому, это расхождение можно объяснить тем, что при расчёте не учитывалось влияние свободной конвекции на коэффициенты турбулентного переноса.

При анализе опытных данных по местной теплоотдаче для случая противоположного направления вынужденной и свободной конвекции у стенки было найдено, что они удовлетворительно обобщаются в системе координат  $Nu / Nu_T$ ,  $Ra_A / Re$ . При значениях  $Ra_A / Re < 0,1$   $Nu / Nu_T = 1$ , т.е. имеет место вязкостно-инерционное течение. При увеличении  $Ra_A / Re$  до 0,5 наблюдается некоторое уменьшение  $Nu / Nu_T$  (до 0,9). При дальнейшем увеличении  $Ra_A / Re$  наблюдается рост величины  $Nu / Nu_T$ , т.е. вязкостно-инерционно-гравитационное течение.

Опытные данные по местной теплоотдаче для случая противоположного направления вынужденной и свободной конвекции у стенки описываются уравнением:

$$\frac{Nu}{Nu_T} = \left(1 + 0,5 \frac{Ra_A}{Re}\right)^{1/3} - 0,15 \exp[-8 \left(\frac{Ra_A}{Re} - 0,5\right)^2] \quad (15)$$

Опытные данные Брауна, полученные для случая вязкостно-инерционно-гравитационного течения при  $Re = 60 + 900$ ,  $Ra_A = 980 + 6550$  и  $Pr = 2,7 + 52$ , также удовлетворительно описываются уравнением (15). Это уравнение справедливо при  $60 \leq Re \leq 25 \cdot 10^3$ ,  $300 \leq Ra_A \leq 8 \cdot 10^5$ ,  $2 \leq Pr \leq 6$  и удовлетворительно описывает как область развитого вязкостно-инерционно-гравитационного течения ( $Ra_A / Re > 0,5$ ), так и область перехода к вязкостно-инерционному течению ( $Ra_A / Re < 0,5$ ). При  $Ra_A / Re > 1$

второй член правой части уравнения (15) становится пренебрежимо малым по сравнению с первым и уравнение принимает более простой вид:

$$\frac{Nu}{Nu_T} = \left(1 + 0,5 \frac{Ra_A}{Re}\right)^{1/3} \quad (16)$$

В уравнениях (15) и (16) число  $Nu_T$  рассчитывалось по уравнению МЭИ (II).

Наряду с исследованием теплообмена на опытном участке №2 были проведены измерения перепада давления для случая совпадения по направлению вынужденной и свободной конвекции у стенки, что позволило определить коэффициент сопротивления трения  $\xi$ .

При анализе вязкостно-инерционно-гравитационного течения методом подобия можно показать, что коэффициент сопротивления трения для случая стабилизированного течения в вертикальной трубе зависят от следующих величин:

$$\xi = \xi(Re, Pr, Gr) \quad (17)$$

С учётом этой зависимости опытные данные по гидравлическому сопротивлению были обобщены с помощью уравнения:

$$\frac{\xi}{\xi_T} = \left[1 + 56 \left(\frac{Ra_A}{Re^{3/2}}\right)^2\right]^{0,4} \quad (18)$$

Где

$$\xi_T = \frac{0,316}{Re^{1/4}} \quad (19)$$

Так как на участке №2 не имелось предвключённого успокоительного участка, то вблизи входа существовал начальный участок, на котором наблюдалось вязкостно-гравитационное течение. Поэтому при расчёте  $\xi$  вводилась поправка на начальный участок. Поскольку данных о гидравлическом сопротивлении в

пределах начального участка при вязкостно-гравитационном течении не имеется, поправка рассчитывалась по данным для изотермического ламинарного течения. Величина поправки составляла не более 15% от общей величины потерь давления на опытном участке.

Уравнение (18) справедливо при  $5 \cdot 10^3 \leq Ra_A \leq 8 \cdot 10^5$ ,  $300 \leq Re \leq 3 \cdot 10^4$  и  $2 \leq Pr \leq 6$ . Физические свойства жидкости в уравнениях (18) и (19) взяты при средней по длине участка температуре жидкости.

При максимальных числах  $Ra_A$  в опытах была получена величина  $\xi/\xi_T \sim 100$ . Однако такое значительное увеличение потерь на трение совершенно не означает соответствующего увеличения затрат энергии на перекачку жидкости через трубу. Объясняется это тем, что при течении жидкости снизу вверх с нагреванием возникает гидростатический напор за счёт уменьшения плотности жидкости по длине трубы, который с избытком компенсирует увеличение потерь на трение. По этой причине в наших опытах при подъёмном движении жидкости перепад давления на опытном участке был отрицательным, т.е. давление на выходе из рабочего участка по абсолютной величине было больше, чем на входе.

### Выводы

I. Проведено экспериментальное исследование теплообмена при течении воды в вертикальных трубах в условиях совместного действия вынужденной и свободной конвекции при постоянной плотности теплового потока на стенке в условиях нагревания как при течении жидкости снизу вверх, так и сверху вниз.

Опыты проведены с тремя вариантами опытного участка и

344566

Центральная научная  
БИБЛИОТЕКА  
Академии наук Киргизии

определяет диапазон значений  $Re$  от 250 до  $3 \cdot 10^4$  и  $Ra_A$  от 250 до  $3 \cdot 10^5$ .

3. Показано, что при вязкостно-гравитационном течении в случае совпадения по направлению вынужденной и свободной конвекции у стенки величина  $Nu/Nu_s \geq 1$  и растет с ростом

$Ra_A$  и  $X$ , а в случае противоположного направления -  $Nu/Nu_s \leq 1$  и уменьшается с ростом  $X$ .

Получены обобщенные зависимости, позволяющие рассчитать местную теплоотдачу при вязкостно-гравитационном течении в различных сечениях трубы как для случая совпадения (3), так и для противоположного направления вынужденной и свободной конвекции у стенки (8).

3. Выведено, что нарушение устойчивости вязкостно-гравитационного течения в случае совпадения по направлению вынужденной и свободной конвекции у стенки происходит при значении  $X > X_{кр}$ , которое уменьшается с ростом  $Ra_A$ .

Получена обобщенная зависимость (6) для определения предела устойчивости вязкостно-гравитационного течения в этих условиях.

4. Показано, что число  $Nu$  при вязкостно-инерционно-гравитационном течении может, в зависимости от чисел  $Ra_A$  и  $Re$ , как уменьшиться, так и увеличиться по сравнению с вязкостно-инерционным (т.е. турбулентным) течением при тех же условиях.

Получены обобщенные зависимости для расчёта теплоотдачи при развитом вязкостно-инерционно-гравитационном течении и в области перехода от вязкостно-инерционно-гравитационного к вязкостно-инерционному течению как в случае совпадения (12),

(14), так и в случае противоположного направления вынужденной и свободной конвекции у стенки (15).

5. Найдена зависимость коэффициента сопротивления трения от чисел  $Ra_A$  и  $Re$  при вязкостно-инерционно-гравитационном течении для случая совпадения по направлению вынужденной и свободной конвекции у стенки (18), из которой следует, что коэффициент сопротивления трения существенно растет с ростом числа  $Ra_A$ .

Материал диссертации докладывался на III Всесоюзном совещании по тепло- и массообмену (г. Минск, 1968 год) и на III научно-технической конференции ИВТ АН СССР (г. Москва, 1968 год). Основное содержание работы опубликовано в сборнике "Тепло- и массоперенос", том I, изд. "Энергия", 1968 и в журнале "Теплофизика высоких температур", №5, 1968.

П р и л о ж е н и е

Основные данные опытных участков

№ участка	1	2	3
Внутренний диаметр, мм	18,84	49,66	49,66
Толщина стенки, мм	0,36	0,40	0,40
Длина обогриваемого участка, мм	1860	4000	998
Длина успокоительного участка, мм	1810	-	3002
$1/4$ обогриваемого участка	99	80	20
$1/4$ успокоительного участка	96	-	60
Число измерительных сечений	11	22	6
Число термистар	29	36	12