

УДК. 536.24

ТЕПЛООБМЕН У ОГРАЖДАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ

Н.В. Селиванов, К.Б. Андريس, О.Н. Селиванова

Астраханский государственный технический университет

Проведено экспериментальное исследование процессов локального теплообмена у ограждающих поверхностей емкости в процессах остывания, подогрева и поддержания температуры высоковязкой жидкости. Получены расчетные уравнения теплообмена для турбулентного и ламинарного режимов течения.

Ключевые слова:

Цилиндрическая емкость, теплообмен, нефтепродукт, остывание, подогрев, эксперимент, ограждающие поверхности

Условные обозначения: a - коэффициент температуропроводности, м²/с; μ и ν - динамическая и кинематическая вязкость соответственно, Па·с и м²/с; α - коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К); q - плотность теплового потока, Вт/м²; t - температура, °С; H - уровень жидкости в емкости, м; d - диаметр емкости, м; φ - дуговая координата, рад; $Ra = g\beta\Delta t d^3 / (\alpha\nu)$ - число подобия Релея; $Pr = a/\nu$ - число подобия Прандтля. Индексы: x - локальный, $ж$ - по температуре жидкости, $с$ - по температуре стенки

Введение

При перевозке высоковязких жидкостей железнодорожным и автотранспортом емкости чаще всего имеют форму горизонтального цилиндра или близкую к нему. Расчет параметров технологической схемы транспортировки, снижение энергозатрат при подогреве высоковязких жидкостей базируются на исследовании процессов теплообмена между жидкостью и ограждающими поверхностями емкости.

Исследованию процессов теплообмена при свободной конвекции в горизонтальной цилиндрической емкости посвящены ряд работ [1 -6]. В работе [1] проведены теоретические и экспериментальные исследования теплообмена в горизонтальном цилиндре. Решения получены приближенными методами на основе интегральных соотношений Кармана-Польгаузена для пограничного слоя аналитическим методом и численным интегрированием в случае ламинарного пограничного слоя для всей цилиндрической поверхности, а для турбулентного при малых значениях продольной координаты. Численные расчеты приведены для Pr от 1 до 20. В результате проведенных теоретических исследований авторы получили расчетные зависимости для среднего коэффициента теплообмена. Отличие результатов, полученных аналитически и численным методом, составляет в среднем 30 - 40 %. Экспериментальные исследования, проведенные на воде, бензине и дизтопливе в двух цилиндрических емкостях диаметром 305 и 975 мм в диапазоне изменения числа $Ra = 10^8 \div 2 \cdot 10^{12}$, при постоянной температуре жидкости, а также при подогреве и остывании, позволили провести сравнение теоретических зависимостей с результатами опытов. Экспериментальные значения среднего по поверхности коэффициента теплообмена оказались на 40-50 % ниже расчетных

Экспериментальные исследования, проведенные в [1, 4] на воде, бензине и дизтопливе в двух цилиндрических емкостях диаметром 305 и 975 мм в диапазоне

изменения числа $Ra = 10^8 \div 2 \cdot 10^{12}$, при постоянной температуре жидкости, а также при подогреве и остывании, позволили провести сравнение теоретических зависимостей с результатами опытов. Экспериментальные значения среднего коэффициента теплообмена оказались на 40–50 % ниже расчетных значений.

В [5] проведено экспериментальное исследование процесса теплообмена в цилиндре при подогреве жидкости, на основании опытных данных получена расчетная зависимость для средней теплоотдачи при ламинарном режим

В работах [6- 8] проведены исследования теплообмена численным методом и экспериментально в горизонтальных кольцевых полостях между горизонтальными концентрическими и эксцентрическими цилиндрами на воздухе для $Ra=10^2 -10^6$. Внутренний цилиндр - нагретый, внешний - холодный. В результате исследований получено, что интенсивность локального теплообмена по дуговой координате наружного цилиндра изменяется в 5 – 8 раз. При угловой координате в диапазоне 140 - 220 градусов процесс переноса теплоты от жидкости к наружному цилиндру осуществляется за счет теплопроводности. Обзор работ по теплообмену в горизонтальных цилиндрических емкостях приведен в работе [9].

Аналитические решения, полученные различными авторами, основаны на аналогии теплообмена у горизонтального цилиндра, что не соответствует физической картине явления при теплообмене внутри горизонтального цилиндра. Т.к. цилиндрическая поверхность имеет температуру ниже, чем температура жидкости, то в верхней части цилиндра вследствие охлаждения жидкости и ориентации твердой поверхности пограничный слой неустойчив и происходит его отрыв. Этому способствует также и положительный градиент давления, возникающий вдоль пограничного слоя.

Теплообмен в горизонтальной цилиндрической емкости изучен не достаточно, т.к. рекомендуемые зависимости для расчета теплообмена дают результаты, различающиеся между собой в 1,5–1,8 раза. Исследований по локальному теплообмену в горизонтальной цилиндрической емкости практически нет. Предварительные натурные эксперименты, проведенные авторами показали, что полученные опытные данные превышают расчетные значения по зависимостям, полученных в работах [1-5] в 2 – 2,5 раза.

Поэтому для детального изучения процесса теплообмена при свободной конвекции высоковязких жидкостей в горизонтальном цилиндре авторами были проведены экспериментальные исследования. Опыты проводились на лабораторной установке, а на горизонтальном цилиндрическом резервуаре объемом 5 и 50 м³ в натуральных условиях.

1.Методика экспериментального исследования. Экспериментальные установки

Лабораторная установка - цилиндрическая емкость диаметром 0,6 м, длиной 0,32 м, изготовлена из листовой стали толщиной 2 мм. Емкость имеет водяную рубашку охлаждения. Для визуального наблюдения гидродинамики естественного конвективного движения жидкости торцевые стенки емкости сделаны из плексигласа (см. рис. 1).

Температура жидкости и стенки измерялась медно-константановыми термопарами диаметром 0.1 –0.15 мм. По вертикали температура измерялась в 18 точках, по горизонтали - в 6 точках, кроме этого по радиальному направлению под углом к вертикали в 10 точках. Локальная плотность теплового потока измерялась 12 тепломерами толщиной 1мм, установленными по окружности с шагом 30°. Описание конструкции тепломера, способа изготовления, тарировка и оценка погрешности измерения подробно изложены в [11].

Для уменьшения влияния краевых тепловых и гидродинамических эффектов внутренняя поверхность теплообмена оклеена листовым плексигласом, толщиной 1 мм. Локальная температура стенки измерялась термопарами, установленными на поверхности тепломера. Измерение термо э.д.с. тепломеров и термопар производилась компенсационным методом потенциометром КСП-4, класс точности 0.5; полуавтоматическим потенциометром Р368 класс точности 0,02 а также цифровым вольтметром Щ1516, класс точности 0.01. Подключение термопар и тепломеров к измерительным приборам проводилось поочередно через щеточные переключатели типа ПМТ-20.

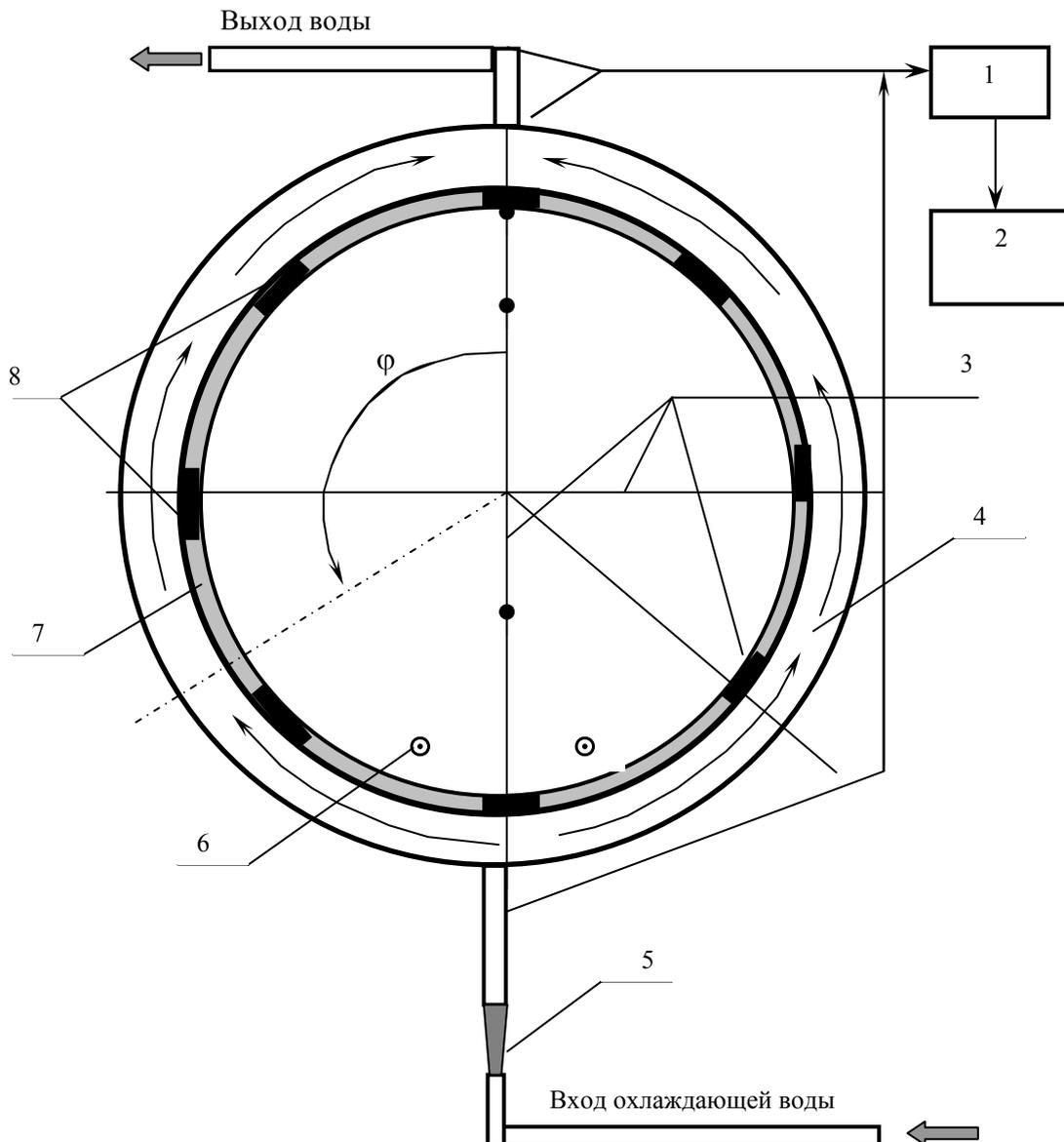


Рис. 1. Схема экспериментальной установки
 1 – пульт; 2 - измерительный блок; 3 – термопары; 4 – охлаждающая полость; 5 – расходомер; 6- электронагреватель; 7 – лист плексигласа; 8 - тепломеры

Для нагревания жидкости и поддержания температуры применялся электрический подогреватель. Мощность нагревателя измерялась К-50, класс точности 0.5 и регулировалась лабораторным регулятором напряжения. Для сведения теплового баланса и проверки правильности полученных результатов измерялась температура охлаждающей воды на входе и выходе из рубашки охлаждения и расход охлаждающей воды расходомером РС-5. В качестве рабочей жидкости использовалось медицинское вазелиновое масло с кинематической вязкостью 33 сСт при 50°C, а также вода дистиллированная. Эксперименты проводились при относительном уровне жидкости в емкости $H/d = 1.0; 0.967; 0.85; 0.59; 0.542; 0.347$ и 0.27.

Эксперименты проводились также на цилиндрических горизонтальных резервуарах объемом 5 и 50 м³ при различных уровнях жидкости. Температура измерялась с помощью медно-константановых термопар, локальная плотность теплового потока - тепломерами, расположенных по периметру окружности, а также по торцевым поверхностям резервуара. Термо-э.д.с. измерялась потенциометрами КСП-4, Р-368 и УПИП-60. В резервуаре емкостью 5 м³ подогрев осуществлялся электрическим подогревателем, а в другом - паровым трубчатый подогревателем.

Расход пара определялся по расходу конденсата объемным методом, т.к. пар подавался влажным, и стандартные расходомеры пара не могут использоваться. Степень сухости греющего пара определялась калориметрическим методом, через каждые 15 – 20 минут путем отбора пара из паропровода на входе в подогреватель и барботаж пара в воду, с известной массой и температурой. После барботажа и конденсации пара в сосуде Дьюара замерялись температура, и масса водо-конденсатной смеси.

В качестве рабочих жидкостей использовались: мазут марки М-100, масло МС-20, компрессорное масло КХ-12, нигрол.

Температура наружного воздуха измерялась лабораторным термометром с ценой деления 0,1 °С, а скорость воздуха - анемометром, интенсивность солнечного излучения - радиометром.

Экспериментальные исследования проводились как при подогреве, так и при остывании и поддержании постоянной температуры жидкости. Температура жидкости изменялась в широком диапазоне от 20 до 65 °С. Температура окружающего воздуха от –5 до 20 °С.

Локальный коэффициент теплообмена определялся по формуле:

$$\alpha_x = q_x / (t_{ж,x} - t_{с,x}),$$

где q_x – локальная плотность теплового потока на стенке, Вт/м²;

$t_{ж,x}, t_{с,x}$ – локальная температура жидкости и стенки, соответственно.

2. Анализ экспериментальных данных и обобщение результатов

Визуальные наблюдения на лабораторной установке позволили выявить особенности гидродинамики в пограничном слое у цилиндрической поверхности. Процесс теплообмена на верхней половине поверхности происходит при вихревом режиме. На нижней половине поверхности пограничный слой стабилизируется, и интенсивность теплообмена уменьшается по сравнению с верхней. Это подтверждают результаты, полученные при исследовании теплообмена в горизонтальной трубе при существенном влиянии термо-гравитационных сил в поперечном сечении [10]. Характер механизма переноса теплоты очень сильно зависит от стратификации по вертикали в поперечном сечении горизонтальной трубы. При неустойчивой стратификации на верхней половине поверхности интенсивность турбулентного переноса импульса и теплоты увеличивается, а при устойчивой – уменьшается и

затухает. Около стенки в случае устойчивой стратификации (нижняя половина поверхности) турбулентный перенос становится соизмерим с молекулярным переносом. Происходит «набухание» вязкого подслоя и распространение влияния молекулярной вязкости и теплопроводности дальше от стенки. Турбулентный перенос теплоты в этих условиях затухает более сильно по сравнению с переносом импульса. При устойчивой стратификации плотности турбулентный пристенный поток может практически полностью ламинаризоваться, а это приводит к существенной неоднородности в распределении характеристик турбулентности по периметру [10]. В нижней половине сечения турбулентные пульсации температуры и скорости практически монотонно уменьшаются, начиная почти от оси до стенки. Это означает, что в этой области не происходит генерация турбулентности, а лишь затухают диффузионно-переносимые сюда возмущения. Различие интенсивности пульсаций у верхней образующей и нижней части очень велико, при этом пульсации вблизи верхней образующей заметно больше, чем вблизи боковой, а в нижней части при углах 170° происходит ламинаризация пристенного течения. Интенсивность теплообмена по периметру изменяется в 3–4 раза.

При полностью заполненной емкости на верхней половине поверхности (от лобовой точки до точки $\varphi = \pi/2$) наблюдается вихревой режим течения вблизи поверхности теплообмена. При этом происходит отрыв вихрей в пограничном слое и уход их в основной объем жидкости. Однако, начиная с углов 30 – 40 градусов, вблизи поверхности теплообмена формируется тонкий ламинарный пограничный подслой, толщина которого с ростом угловой координаты постепенно увеличивается. Однако с ростом числа подобия Релея турбулентное течение захватывает и нижнюю часть поверхности, достигая угловой координаты 120 – 130 градусов. На нижней половине поверхности наблюдается устойчивый ламинарный пограничный слой при $Ra < Ra_{кр}$. При относительной высоте уровня жидкости не более 0,6 наблюдается только ламинарный пограничный слой у поверхности во всем диапазоне изменения числа Релея. Такая гидродинамическая картина в пограничном слое обусловлена ориентацией поверхности теплообмена в поле массовых сил, направлением поперечного градиента температуры вблизи твердой поверхности и ее кривизной, и совпадает с результатами работы [10].

В процессах остывания температурное поле по вертикали емкости неравномерно, а по горизонтали практически постоянное, за исключением пограничного слоя. В придонной области емкости образуется малоподвижный слой, толщина которого по мере остывания увеличивается. процесс переноса теплоты от жидкости к наружному цилиндру осуществляется за счет теплопроводности. При подогреве жидкости температурное поле по вертикали более равномерное, а основное изменение происходит в придонном малоподвижном слое. Толщина малоподвижного слоя определяется высотой расположения нагревателя. При поддержании постоянной температуры основная масса жидкости за исключением пограничных слоев у поверхности представляет собой изотермическое ядро.

Исходя из теории обобщенных переменных, локальный теплообмен в горизонтальной цилиндрической емкости с учетом температурного фактора [12] будет определяться следующей зависимостью:

$$Nu_{d,ж} = C Ra_{d,ж}^n (\mu_{ж}/\mu_{с})^{0/17}, \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности является функцией $C = f(Pr, H/d, \varphi)$.

При обработке экспериментальных данных за определяющую температура принималась температура жидкости в ядре, а за определяющий размер – диаметр

емкости. Экспериментальные данные при получении расчетных зависимостей для локального теплообмена с учетом результатов визуальных наблюдений были разбиты по относительному уровню жидкости в емкости, по процессам: подогрев; остывание и поддержание.

На рис.2. приведены экспериментальные данные по локальному теплообмену в зависимости от угловой координаты в цилиндрической емкости при относительном уровне жидкости в диапазоне от 0,6 до 1,0 для процесса подогрева и поддержания. Как показал анализ экспериментальных результатов, локальный теплообмен при турбулентном режиме не зависит от величины H/d . При этом турбулентный режим сохраняется до углов 90° во всем диапазоне чисел Релея, наблюдаемых в экспериментах. При дуговой координате более 90° наблюдается переход турбулентного режима в ламинарный, если число Релея становится меньше определенной критической величины (см. рис. 2.).

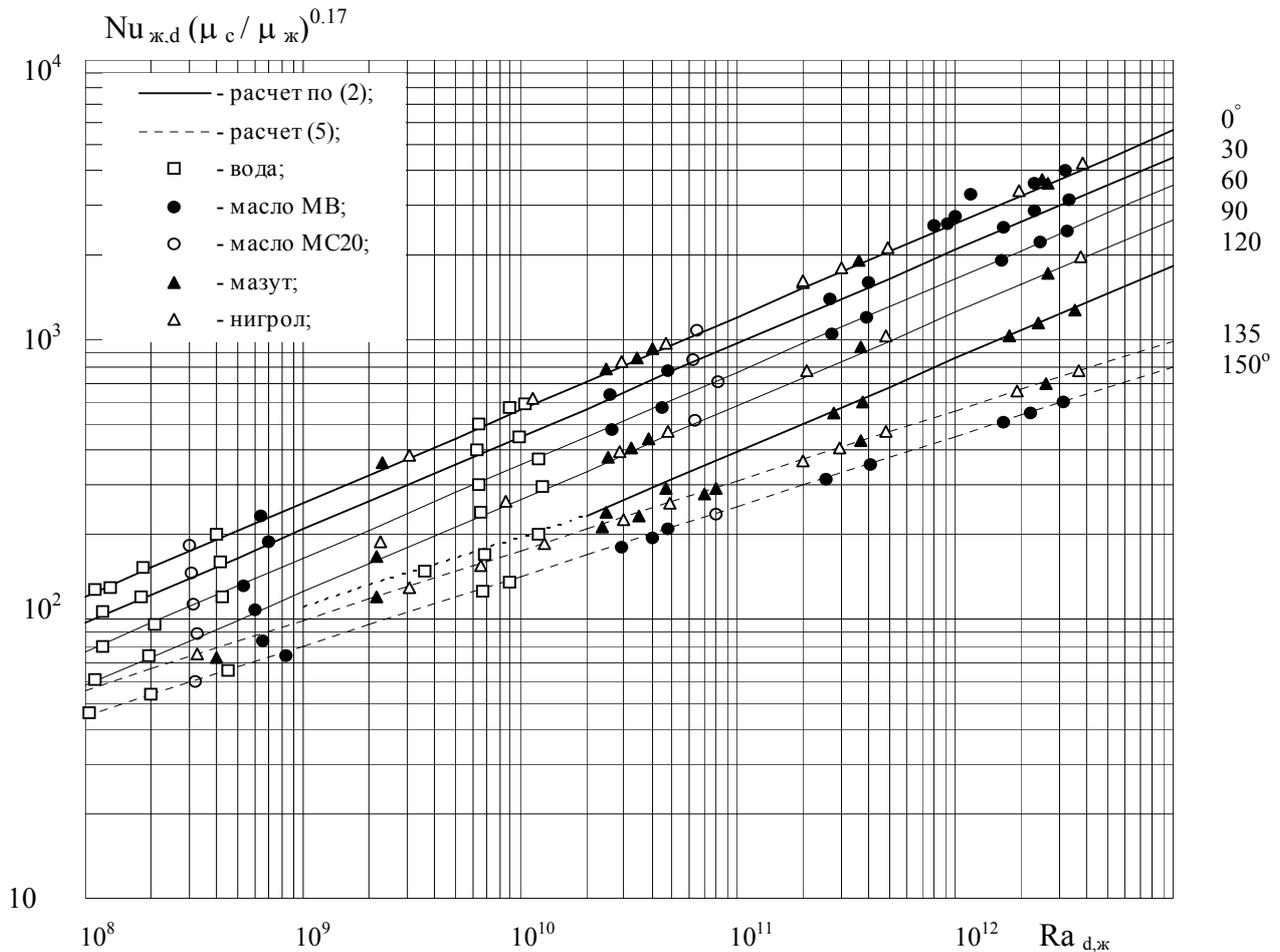


Рис. 2. Локальный теплообмен у ограждающей поверхности горизонтальной емкости

В результате обработки экспериментальных данных получена зависимость, обобщающая данные по локальному теплообмену при турбулентном режиме:

$$Nu_{д,ж} = (0,26 - 0,091\varphi^{0,88}) Ra_{д,ж}^{1/3} (\mu_ж / \mu_c)^{0,17}. \quad (2)$$

Данная зависимость справедлива при $Ra_{d,ж} > Ra_{кр}$. Величина критического значения числа Релея определяется из формулы:

$$Ra_{кр} = 10^8 \cdot (8,58 - 4,71 H/d) \cdot \exp[7,545(\varphi - \pi/2)]. \quad (3)$$

Из зависимости (2.100) можно определить величину угла перехода вихревого режима в ламинарный, зная относительный уровень жидкости в емкости и число Релея

$$\varphi_{кр} = \pi/2 + 0,133 \cdot \ln[Ra_{d,ж} / (8,58 - 4,71 H/d)] - 2,44, \text{ рад.} \quad (4)$$

Анализ экспериментальных данных по теплообмену при ламинарном пограничном слое ($\varphi > \varphi_{кр}$) показал, что величина C зависит не только от угловой координаты но и от относительного уровня жидкости в емкости, а степень влияния числа Релея на теплообмен равна 0,25 (рис. 3 и 4)

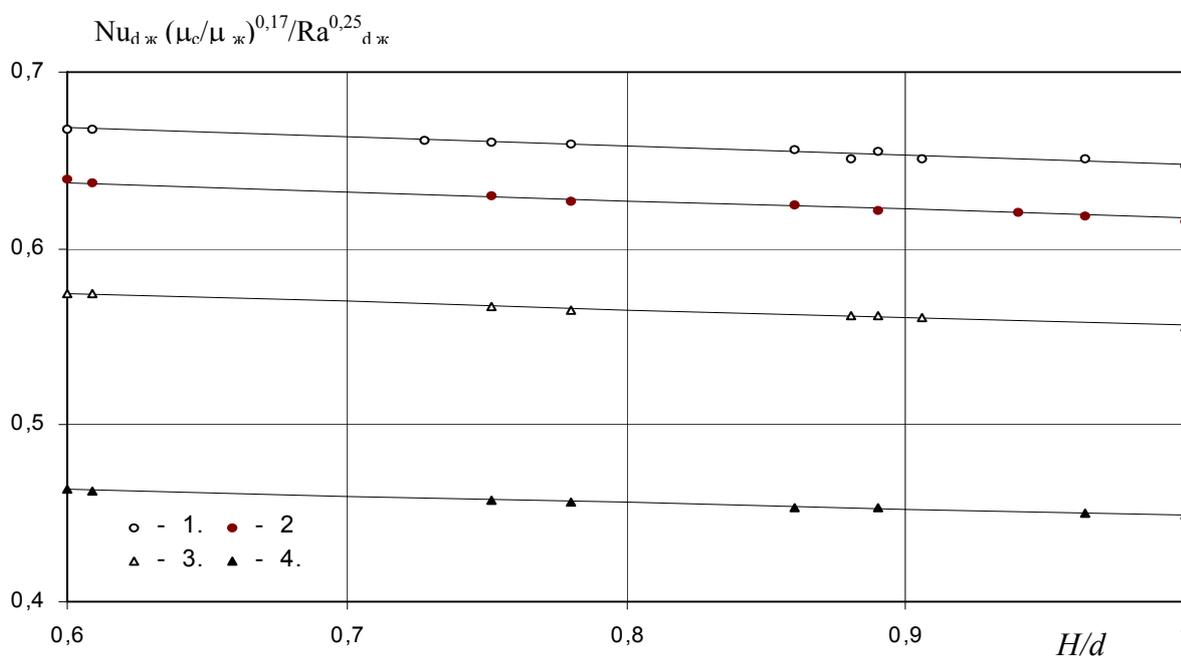


Рис.3. Локальная теплоотдача в цилиндрической емкости при ламинарном режиме.

$$0,6 \leq H/d \leq 1,0.$$

$$1 - \varphi = 90^\circ; 2 - 120^\circ; 3 - 135^\circ; 4 - 150^\circ.$$

Экспериментальные данные в зоне ламинарного режима при $H/d > 0,6$ с погрешностью не более 10% обобщаются следующей зависимостью:

$$Nu_{d,ж} = (0,7 - 0,052 H/d) [1 - 0,271(\varphi - \pi/2)^{2,7}] Ra_{d,ж}^{0,25} (\mu_ж / \mu_c)^{0,17}. \quad (5)$$

Средняя по поверхности теплоотдача определялась по средним интегральным по поверхности плотности теплового потока и температуре.

При обработке экспериментальных данных физические свойства жидкости принимались по средней интегральной температуре жидкости в емкости, а за определяющий размер принимался диаметр емкости. Для процесса подогрева и поддержания постоянной температуры при $H/d \geq 0,6$ экспериментальные данные по средней теплоотдаче обобщаются зависимостью (рис. 5):

$$Nu_{d,ж} = 0.135 Ra_{d,ж}^{1/3} (\mu_{ж} / \mu_{с})^{0.17}. \quad (6)$$

Зависимость (6) согласуется с зависимостью, полученной в результате обобщения экспериментальных по теплообмену при турбулентной свободной конвекции [10].

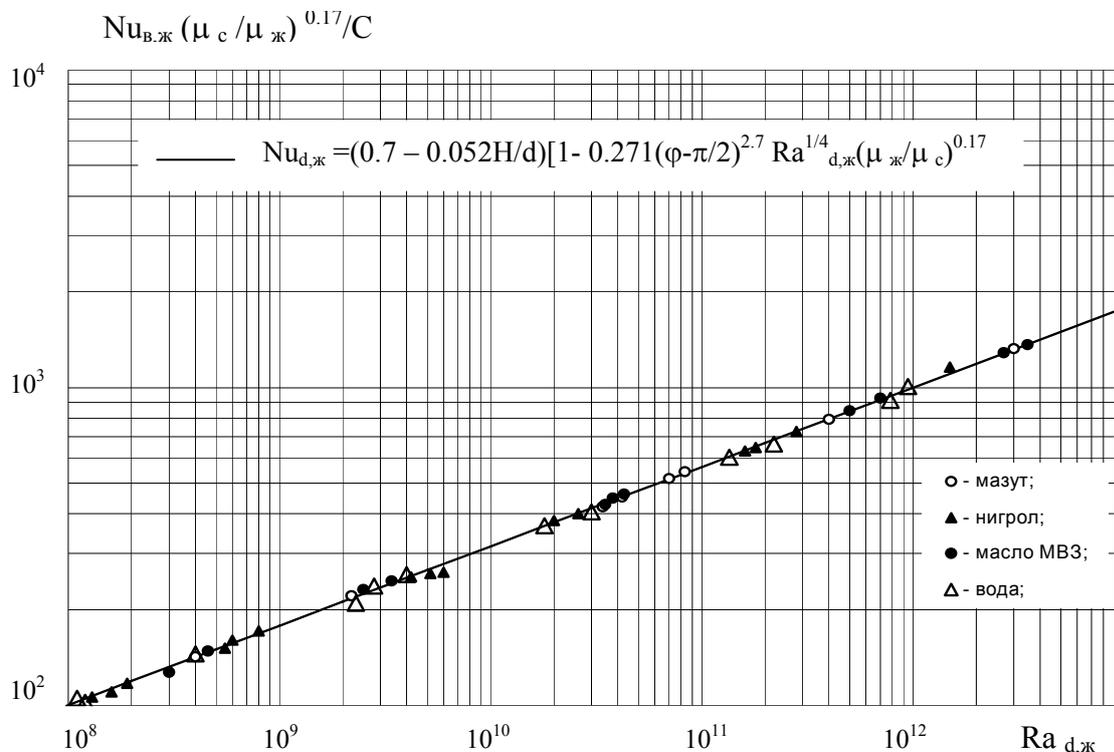


Рис. 4. Локальный теплообмен в горизонтальной цилиндрической емкости для ламинарного режима при подогреве и постоянной температуре. $H/d > 0.6$

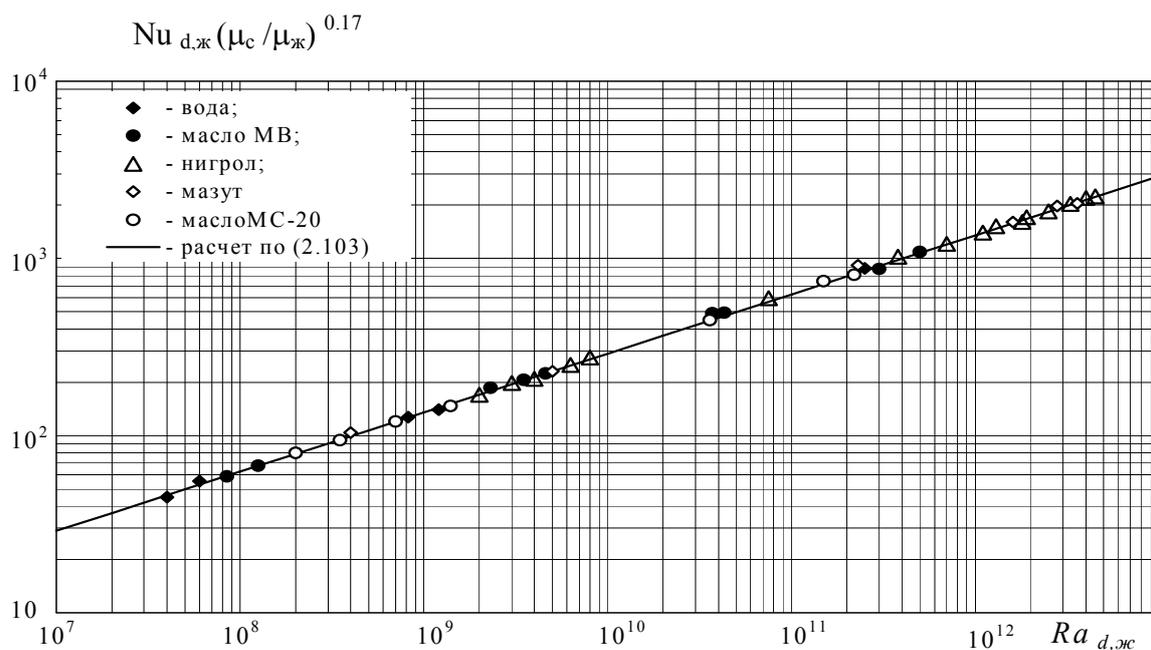


Рис.5. Средняя теплоотдача в горизонтальной емкости при подогреве и постоянной температуре жидкости. $0.6 \leq H/d \leq 1.0$

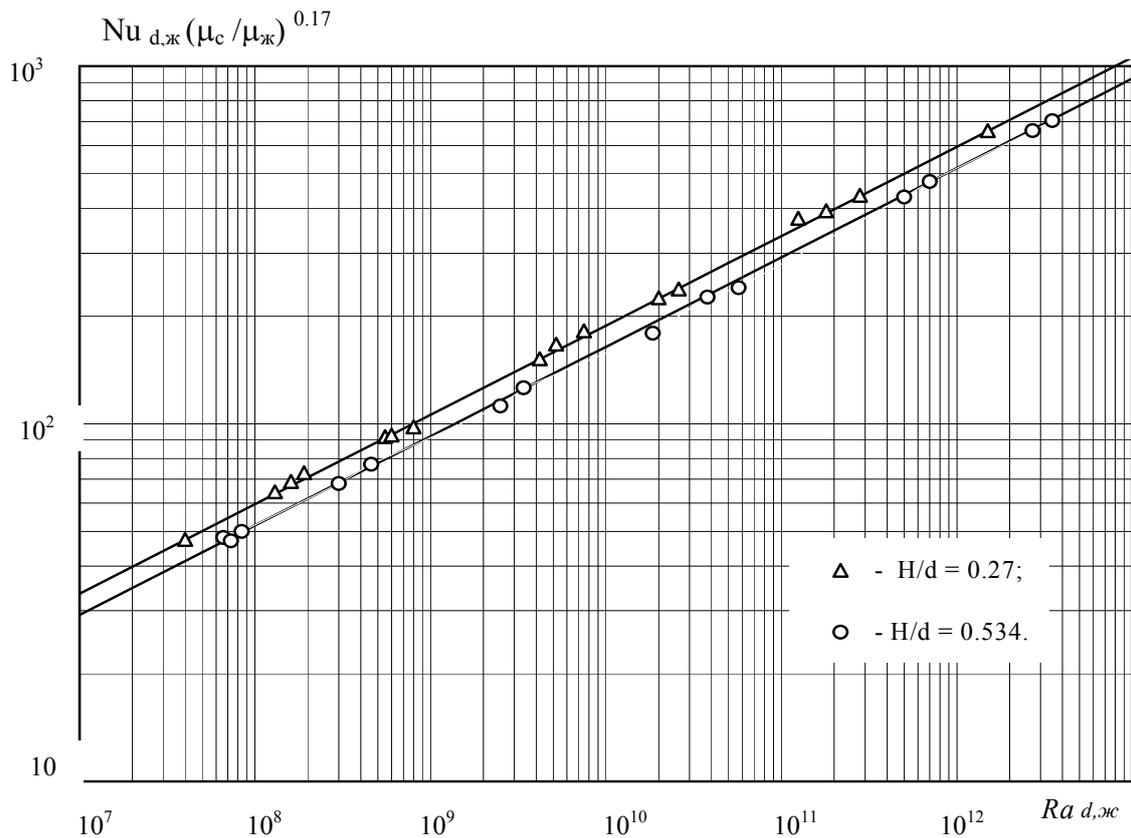


Рис. 6. Средняя теплотдача в горизонтальном цилиндре при подогреве и поддержании. $H/d < 0.6$.

При уровне жидкости $H/d \leq 0.6$ в процессах подогрева и поддержания средняя теплотдача зависит от уровня жидкости в емкости (рис. 6 и 7) и экспериментальные данные обобщаются критериальным уравнением:

$$Nu_{d,ж} = (0.66 - 0.24 H/d) Ra_{d,ж}^{0.25} (\mu_{ж} / \mu_c)^{0.17}, \quad (7)$$

которое справедливо при $2 \cdot 10^7 \leq Ra_{d,ж} \leq 4 \cdot 10^{12}$.

В процессе охлаждения жидкости в емкости средний коэффициент теплообмена можно рассчитать по уравнению, которое обобщает экспериментальные данные, полученные на лабораторной установке, цилиндрических резервуарах диаметром 1,83 и 2,6 м. (рис. 7), для полностью заполненной емкости:

$$Nu_{d,ж} = 0.844 Ra_{d,ж}^{0.235} (\mu_{ж} / \mu_c)^{0.17}. \quad (8)$$

Уравнение (8) справедливо при $6 \cdot 10^7 \leq Ra_{d,ж} \leq 4 \cdot 10^{12}$; $5 \leq Pr_{ж} \leq 2 \cdot 10^4$; $H/d = 1$.

Выводы

Таким образом, в результате проведенных исследований теплообмена и гидродинамики высоковязких жидкостей в горизонтальной цилиндрической емкости выявлено:

1. основная масса жидкости в емкости представляет собой изотермическое ядро, а изменение температуры наблюдается в пределах пограничного слоя у ограждающих поверхностей емкости.
2. Интенсивность теплообмена у ограждающей поверхности определяется уровнем жидкости, а также технологическими процессами (поддержание температуры, нагрев или остывание жидкости в емкости)
3. Выявлена гидродинамическая картина течения при свободной конвекции у цилиндрической поверхности емкости, определены границы вихревого и ламинарного режимов течения.
4. Получены расчетные уравнения для локального и среднего теплообмена
5. Полученные зависимости (2) -(8) для локального и среднего по поверхности теплообмена внутри цилиндрической емкости в процессе подогрева и остывания жидкости, а также поддержания ее температуры могут использоваться для расчета теплообмена в цилиндрических горизонтальных резервуарах и динамики тепловых процессов в цилиндрических емкостях, а также в железнодорожных и автоцистернах при транспортировке высоковязких жидкостей.

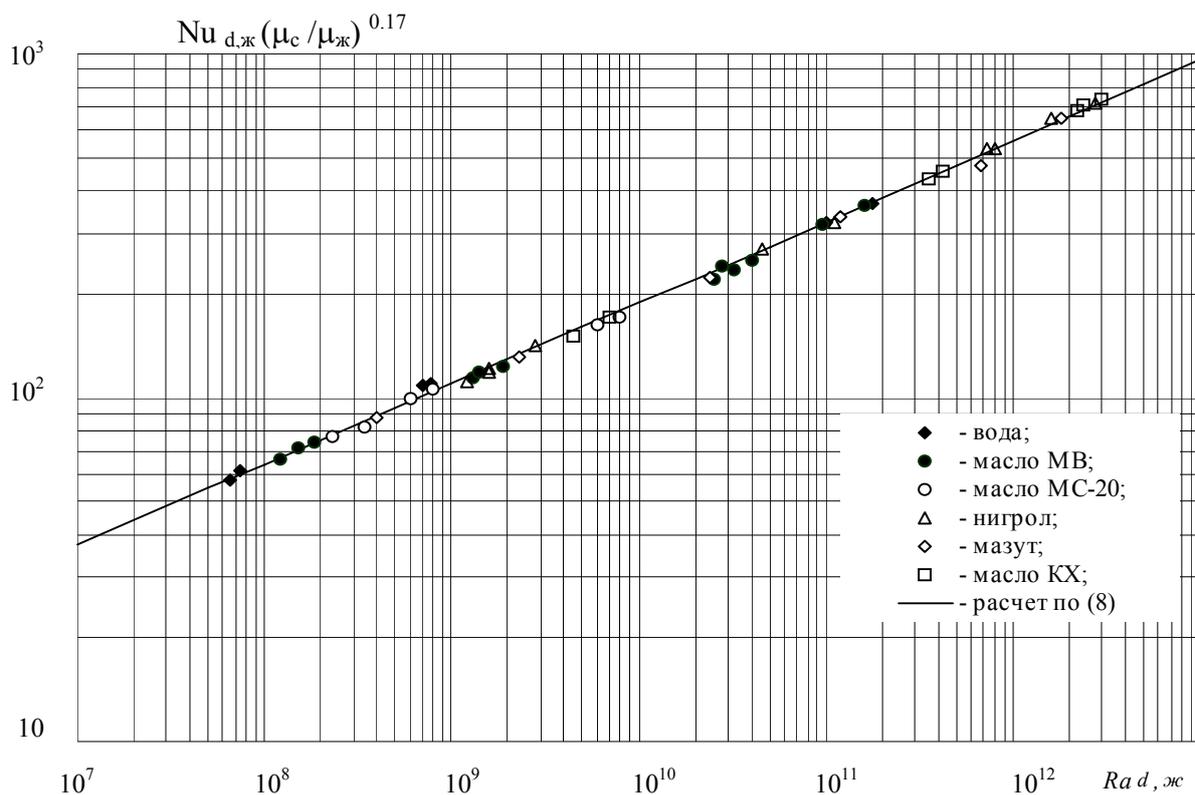


Рис.7. Теплообмен в горизонтальной цилиндрической емкости в процессе остывания. $H/d = 1$.

Литература

1. Губин В.Е., Юсупов Ю. Т. и др. Свободная конвекция в горизонтальном цилиндре// Труды ВНИИСПТнефть. Уфа: 1971. Вып. 8. С. 96-101.
2. Зимин В.Д. Естественная конвекция внутри горизонтального кругового цилиндра // Изв. АН СССР. Сер. Механика жидкости и газа. 1971. №2. С. 172-174.

3. Орешина М. Д., Хозиев Н. Н., Шемякина Г. Н. Численное исследование теплообмена в горизонтальном цилиндре в условиях свободной конвекции жидкости // Труды ВНИИСПТнефть. Уфа: 1972. Вып. 9. С. 125-128.
4. Шемякина Г.Н. Исследование свободной конвекции при хранении нефти и нефтепродуктов. Дисс. .. канд. техн. наук. Уфа: 1978.
5. Evans J. D. Stefany N. E. An experimental study of transient heat transfer to liquids in cylindrical enclosure // Chor. Eng. Progr/ Sumpej. 1966/ vol. 52, № 64. P.27-32.
6. Кьюэн, Гольдстайн. Экспериментальное исследование теплоотдачи при свободной конвекции между горизонтальными концентрическими и эксцентрическими цилиндрами // Теплопередача. 1978. т. 100, № 4. С.80-86.
7. Хессами М.А., Поллард А., Роу Р.Д. и др. Исследование свободно-конвективной теплоотдачи в горизонтальных кольцевых каналах с большим отношением радиусов // Теплопередача. 1985.т. 107. № 3. С. 92-99.
8. Хессами М.А., Поллард А., Роу Р.Д. Численный расчет свободно-конвективного теплообмена между горизонтальными концентрическими изотермическими цилиндрами // Теплопередача. 1984. № 3. С.145-149.
9. Селиванов Н.В. Теплообмен высоковязких жидкостей в емкостях. Монография. Астрахань: АГТУ, 2001. 232 с.
10. Петухов Б.С., Поляков А.Ф. Теплообмен при смешанной турбулентной конвекции. М.: Наука, 1986. 192 с.
11. Щербаков А.З., Селиванов Н.В. Измерение локальной плотности теплового потока при изменяющихся во времени граничных условиях // НТС. Тепло-массообмен в химической технологии. Казань. 1978. №6. с. 44-47.
12. Селиванов Н.В. Влияние переменной вязкости жидкости на теплообмен при ламинарной конвекции // ИФЖ. 2002. Т. 75, № 6. С. 133 – 136.