

ТЕПЛОТЕХНИКА

В. С. ЯБЛОНСКИЙ и В. П. ЯБЛОНСКАЯ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА МЕЖДУ
ДВУМЯ НЕСМЕШИВАЮЩИМИСЯ ЖИДКОСТЯМИ**

(Представлено академиком М. В. Кирпичевым 24 I 1948)

При подогреве вязких и застывающих нефтепродуктов в емкостях наряду с паровыми змеевиками пользуются водозеркальным методом⁽¹⁾. Подогреваемая паром вода, имеющая удельный вес больший, чем удельный вес нефтепродукта, располагается внизу, и теплообмен происходит через зеркало раздела вода — нефтепродукт.

Как в нефтепродукте, так и в воде возникает свободная конвекция. На границе вода — нефтепродукт: а) скорости обеих жидкостей не равны нулю, б) температуры воды и нефтепродукта равны по величине, в) благодаря малой вязкости воды силами трения можно пренебречь.

В этих условиях уравнения Навье — Стокса для установившегося движения будут иметь вид:

$$(\bar{v}, \nabla) \bar{v} = \bar{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p, \quad (1)$$

где \bar{F} — ускорение массовой силы, в рассматриваемом случае подъемной силы, будет:

$$\bar{F} = \bar{g} \rho \beta \theta, \quad (2)$$

$\beta = -\frac{1}{\gamma} \frac{d\gamma}{d\theta}$ — коэффициент объемного расширения жидкости и θ — избыточная температура жидкости, отсчитываемая от температуры зеркала воды.

Уравнение неразрывности имеет вид

$$\text{div}(\rho, \bar{v}) = 0, \quad (3)$$

уравнение теплопроводности может быть записано в форме

$$\alpha \nabla^2 \theta = (\text{grad } \theta, \bar{v}). \quad (4)$$

Система дифференциальных уравнений (1) — (4) определяет явление свободной конвекции как в нефтепродукте, так и в воде. Пограничные условия сформулированы выше.

Анализ этих уравнений с помощью метода подобия⁽²⁾ дает следующую систему критериев подобия:

$$\frac{Lg\beta\theta}{v^2} = \text{idem}; \quad \frac{\Delta p}{\rho v^2} = \text{Eu} = \text{idem}; \quad \frac{vLc\gamma}{\lambda} = \text{Pe} = \text{idem}.$$

Для случая свободной конвекции определяющим критерием будет следующая их комбинация:

$$\left(\frac{\nu L c_1}{\lambda}\right)^2 \frac{L g \beta \theta}{\nu^2} = Gr \cdot Pr^2.$$

Отдельные указания на существование такого рода критерия можно встретить у Гребера и Эрка (3) и др.

Таким образом, экспериментальный закон для коэффициента теплопередачи от жидкости к жидкости определялся нами в форме зависимости:

$$\overline{Nu} = f(\overline{Gr} \cdot \overline{Pr}^2). \quad (5)$$

На двух опытных установках лаборатории транспорта и хранения Московского нефтяного института им. акад. И. М. Губкина нами были определены коэффициенты теплопередачи от воды к веретенному маслу

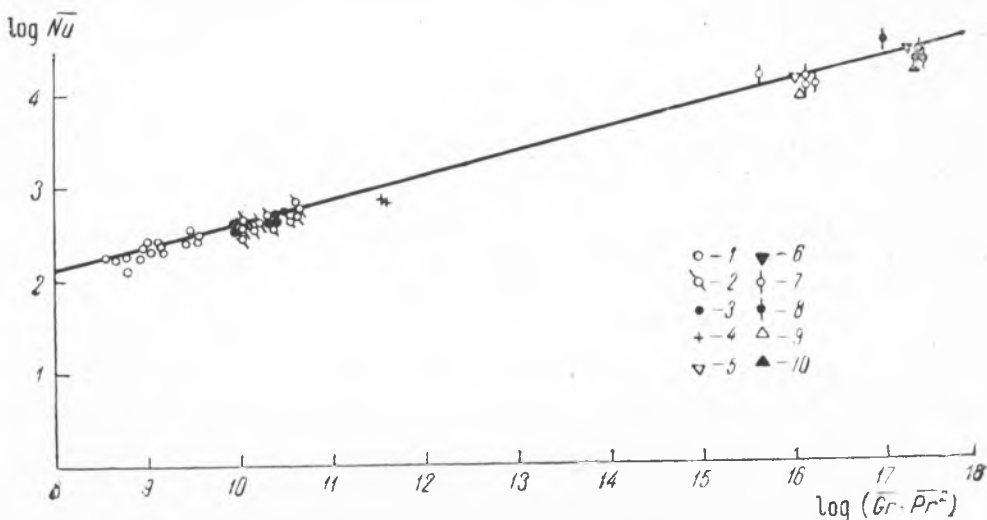


Рис. 1. Первая лабораторная установка: 1 — вода, 2 — веретенное масло, 3 — керосин. Вторая лабораторная установка: 4 — веретенное масло, 5 — вода; производственные опыты: 6 — автол 18, 7 — вода, 8 — мазут флотский, 9 — вода, 10 — мазут В. Прямая линия — эмпирический закон (6)

и от воды к керосину. В опытах определялись температуры воды, границы (водяного зеркала) и нефтепродукта, а также тепловой поток через пограничную поверхность. Таким образом, из каждого опыта нами вычислялись два коэффициента теплопередачи и соответственно две пары значений параметров Грасгоффа и Прандтля. Все физические константы обеих жидкостей относились к температуре пограничной поверхности.

Результаты опытов, представленные на рис. 1, обработаны по способу наименьших квадратов, и получена следующая эмпирическая формула:

$$\overline{Nu} = 1,15 (\overline{Gr} \cdot \overline{Pr}^2)^{0,254}.$$

Для практических расчетов авторами рекомендуется более простая зависимость

$$\overline{Nu} = 1,25 (\overline{Gr} \cdot \overline{Pr}^2)^{0,250}. \quad (6)$$

Нам удалось также обработать результаты опытов по исследованию водозеркального подогрева в производственных условиях.

Температура пограничной поверхности в этих опытах не замерялась, а вычислялась нами по формуле

$$T_{\text{гр}} = \frac{T_2 + \varphi^{0,2} T_1}{1 + \varphi^{0,2}}, \quad (7)$$

где T_1 — температура воды и T_2 — температура нефтепродукта,

$$\varphi = \frac{\lambda_1^2 \beta_1 c_1^2 \gamma_1^2}{\lambda_2^2 \beta_2 c_2^2 \gamma_2^2},$$

λ — коэффициент теплопроводности, c — теплоемкость и γ — удельный вес.

Результаты обработки этих экспериментов (рис. 1) полностью подтвердили практическую формулу (6) в диапазоне значений $\overline{Gr} \cdot \overline{Pr}^2$ от 10^8 до 10^{18} .

Это позволило авторам построить рабочую формулу для определения полного коэффициента теплопередачи от воды к нефтепродукту:

$$K_i = \frac{kD}{\lambda_2} = 1,25 n (\overline{Gr}_2 \cdot \overline{Pr}_2^2)^{0,25}, \quad (8)$$

где D — диаметр резервуара и

$$n = \frac{\varphi^{0,25}}{(\varphi^{0,2} + 1)^{1,25}}. \quad (9)$$

Критерии Грасгоффа и Прандтля в этой формуле вычисляются по физическим константам нефтепродукта, отнесенным к температуре пограничной поверхности.

Как показали некоторые подсчеты, значения факторов φ и n при подогреве различных нефтепродуктов меняются в небольших пределах, что объясняется относительно малым различием их физических констант λ , c , γ и β , а также малым значением показателя степени (0,2 и 0,25). Для практических расчетов может быть использован график рис. 2, представляющий зависимость фактора n от температуры пограничной поверхности для мазутов.

При водозеркальном подогреве температура зеркала мало отличается от температуры воды, что дает возможность при практических расчетах относить физические константы нефтепродукта к температуре воды. Эти два упрощения могут вызвать ошибку в расчете не более, чем на 5%.

Московский нефтяной институт
им. И. М. Губкина

Поступило
22 XI 1947

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. С. Яблонский, И. А. Чарный, В. М. Покровский и Е. К. Диденко, Расчет, конструкция и эксплуатация водозеркального подогрева, 1933.
- ² М. В. Кирпичев, М. А. Михеев и Л. С. Эйгенсон, Теплопередача, 1940.
- ³ Г. Гребер и С. Эрк, Основы учения о теплообмене, 1936.
- ⁴ Г. М. Григорян, Подогрев нефтяных продуктов, 1935.

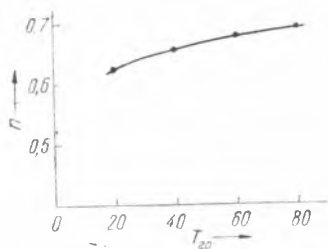


Рис. 2