

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДОГРЕВА НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

Н.В. Селиванов, С.Н. Головчун

Астраханский государственный технический университет

В работе представлены теоретические данные по изучению процесса подогрева высоковязких жидкостей. В качестве возможных источников теплоты рассмотрено два варианта: при заданной температуре поверхности и при заданном тепловом потоке. Авторами предложена оригинальная система крупнопорционного разогрева жидкости и найдены основные уравнения, описывающие динамику процесса для широкого диапазона чисел Прандтля. Полученные данные согласуются с уже имеющимися решениями для малых чисел Прандтля.

Ключевые слова

Гидродинамика, теплообмен в следе, линейный источник теплоты, высоковязкие жидкости.

Условные обозначения

$\eta = (y/x) \sqrt[4]{Gr_x}$ - переменная подобия; $f(\eta)$ – безразмерная функция тока;

$Gr = g\beta\Delta t \frac{x^3}{\nu^2}$ - число Грасгофа (при $t=\text{const}$); $Gr_x = g\beta T_* \frac{x^3}{\nu^2}$ - число Грасгофа (при

$q=\text{const}$); $\theta(\eta) = \frac{t - t_a}{t_s - t_a}$ - безразмерная температура ; β - температурный коэффициент

объемного расширения, $1/\text{K}$; g - ускорение свободного падения, m/c^2 ;

x, y – продольные и поперечные координаты, m ; $T_* = \frac{q}{\lambda}$ – температур, K ;

ρ – плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$; λ - коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{K}$;

l – характерный размер, длина, m ; Δt – разность температур, K ; ν - кинематический

коэффициент вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; $f(\eta)$ – безразмерная функция тока; t_s – температура на

центральной линии факела, K ; t_a – температура окружающей среды, K ;

t – текущая температура, K ;

Введение

Задача поиска и внедрения эффективных и энергосберегающих технологий в энергетическую промышленность на фоне резкого скачка цен на нефтепродукты является сегодня крайне актуальной. Основной, и на данный момент самой доходной составляющей энергетической промышленности, является нефтедобывающий и нефтеперерабатывающий сектор. Добыча нефти и её дальнейшая переработка включает в себя множество технологических процессов. От того, на сколько все они оптимально организованы, зависит экономическое и экологическое благополучие отдельного предприятия и отрасли в целом. Одним из таких этапов по переработке и хранению нефтепродуктов является процесс подогрева высоковязких жидкостей. При этом в большинстве случаев используются старые технологии, которые приводят к огромным тепловым потерям. В результате этого растут издержки предприятия и как следствие

удорожание и без того дорогой продукции, что в свою очередь напрямую влияет на выживаемость и конкурентоспособность отрасли.

В настоящее время все системы подогрева в основном спроектированы таким образом, что подогревается весь объем жидкости находящийся в резервуаре. В качестве альтернативы традиционным системам подогрева нефтепродуктов авторами предложена оригинальная идея использования системы крупнопорционного подогрева [1]. При этом способе подогревается лишь область над нагревателем и на определенной высоте над ним она отбирается, таким образом затраты на подогрев идут лишь на необходимое количество жидкости. Системы такого типа могут успешно применяться на ТЭЦ, нефтеперерабатывающих и нефтеперегонных заводах, нефтебазах. Использование системы крупнопорционного подогрева позволяет снизить тепловые потери на 20-30% и исключает необходимость изолировать резервуар. В качестве нагревателя используется трубный подогреватель, который с учетом размеров цистерны, можно принять за линейный источник теплоты. Для создания системы локального подогрева необходимо знать основные геометрические и технологические параметры устройства. Их можно определить, исследуя тепломассообмен и гидродинамику при подогреве над линейным источником тепла [2].

Постановка задачи

Анализом динамики процесса подогрева различных жидкостей занимались многие ученые [3]. Первым рассмотрел её Зельдович, который воспользовался методами подобия. Шу провел детальный анализ течения методом подобия и представил результаты при $Pr=0,7$. Для значений $Pr=2/3$ и $7/3$ Йи получил решения в замкнутой форме. Фудзи провел детальный анализ течения, нашел решение в замкнутом виде для $Pr=2$ и получил численные результаты для чисел Прандтля 0,01; 0,7; 10. Сполдинг и Круддейс исследовали течение при больших числах Прандтля. Гебхарт, Пера и Шорр изучили течение, представив его просто как другой случай вертикального пограничного, слоя и использовали метод, разработанный ранее для вертикальных поверхностей

Ими найдены решения для чисел Прандтля до 100 [3]. В основном же системы подогрева конструируются для подогрева нефтепродуктов с большим значением числа Прандтля. В связи с чем, авторы поставили перед собой задачу – найти решения системы уравнений, описывающих процесс, для высоковязких жидкостей, обобщить их и получить зависимости, позволяющие определить основные параметры систем подогрева.

Исследование проводилось для подогрева с двумя типами нагревательного элемента: в первом случае с заданным тепловым потоком, во втором с заданной температурой поверхности нагревателя, для теплового и динамического слоя. В качестве примера для первого случая можно привести электрический нагреватель, а для второго – разогрев паром.

Решение

Поскольку в потоке нет других источников теплоты, вязкой диссипацией можно пренебречь, и полная тепловая энергия, переносимая в пограничном слое, должна быть постоянной. Для жидкости с постоянными физическими свойствами дифференциальные уравнения пограничного слоя над линейным источником тепла имеют вид:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g\beta(t-t_{ж}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} = a \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Введение функции тока ψ , удовлетворяющей уравнению сплошности:

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, v = -\frac{\partial \psi}{\partial x},$$

и обобщенных переменных: $\eta = (Gr_x / 4)^{1/4} y/x$; $\psi = 4 \nu (Gr_x / 4)^{1/4} f(\eta)$;

$$\theta = (t - t_a) / (t_s - t_a),$$

соответствующие обыкновенные дифференциальных уравнений (1)–(3), полученные для степенного закона распределения избыточной температуры, приводит к системе обыкновенных дифференциальных уравнений к виду:

$$f''' + (n + 3)ff'' - 2(n + 1)f'^2 + \theta = 0 \quad (4)$$

$$\theta'' + (n + 3)Pr[f'\theta + f\theta'] = 0 \quad (5)$$

Для двумерного факела при заданной температуре поверхности линейного источника тепла $n = -3/5$, и уравнения (4)–(5) принимают вид:

$$f''' + \frac{12}{5}ff'' - \frac{4}{5}f'^2 + \theta = 0 \quad (6)$$

$$\theta'' + \frac{12}{5}Pr[f'\theta + f\theta'] = 0 \quad (7)$$

с граничными условиями:

$$\eta=0, \theta'(0) = f(0) = f''(0) = 0, \theta(0) = 1.$$

Решения систем дифференциальных уравнений, описывающих процесс, получены численно по стандартной программе в системе MathCAD методом пристрелки для чисел Прандтля от 10 до 10000.

По результатам решений уравнений (6) и (7) были получены профили температурного поля и скорости, представленные на рис.1 и рис.2. Анализируя полученные данные, можно сделать заключение, что с возрастанием числа Прандтля профиль безразмерной температуры стремиться к вертикальной прямой, т.е. температура на оси относительно безразмерной координаты стремиться к нулю. А из рисунка скоростных полей можно сделать вывод о том, что с ростом числа Прандтля изменяется максимальная скорость на оси течения, а профиль скорости принимает все более пологий вид относительно безразмерной координаты. При росте числа Прандтля факел, образующийся над источником, сужается, это обусловлено повышением вязкости подогреваемой жидкости, т.е. при $Pr \rightarrow \infty$ факел «стягивается» в вертикальную линию.

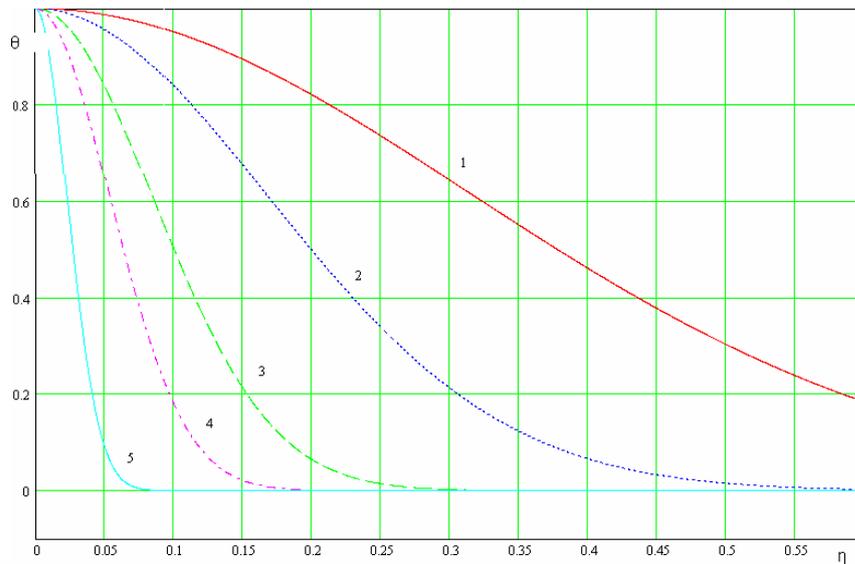


Рис.1. Рассчитанные профили температуры.
 1 - Pr=10, 2 - Pr=100, 3 - Pr=300, 4 - Pr=1000, 5 - Pr=10000

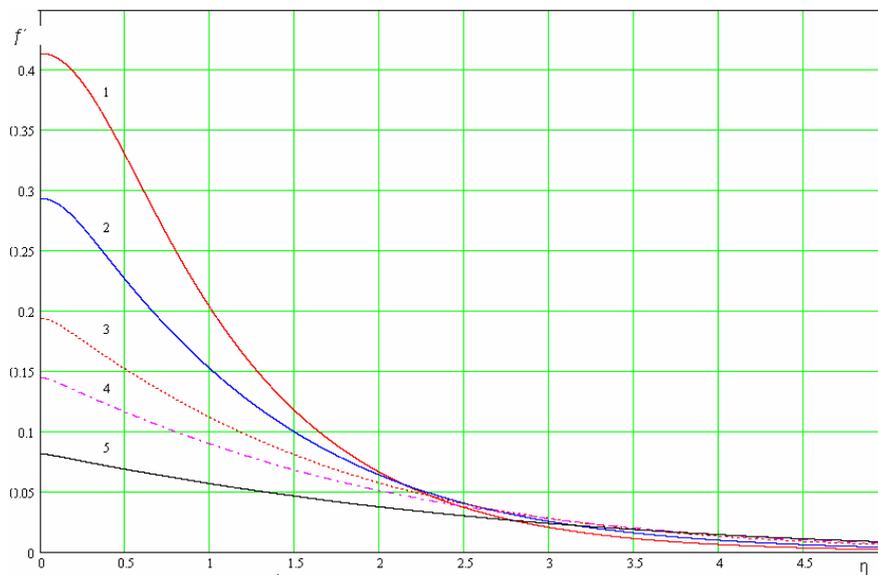


Рис.2. Рассчитанные профили скорости.
 1 - Pr=10, 2 - Pr=100, 3 - Pr=300, 4 - Pr=1000, 5 - Pr=10000

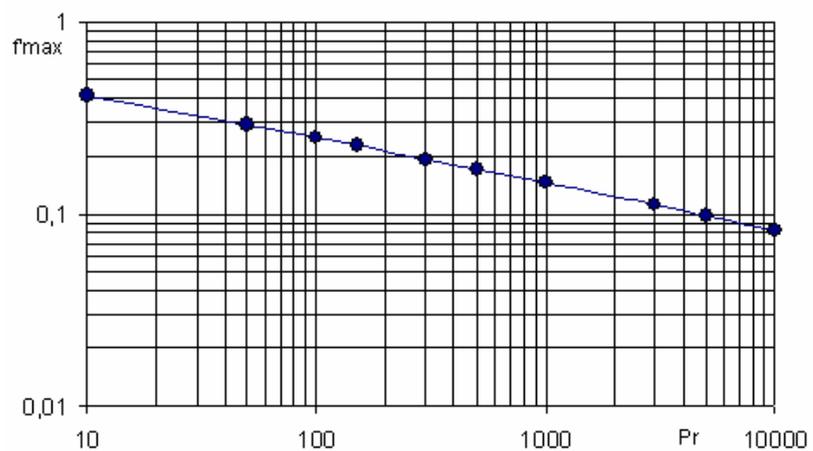


Рис.3. Зависимость максимальной скорости от числа Прандтля.

Из рис. 2. были определены зависимость максимальной скорости на оси факела от числа Прандтля (рис.3). И найдено выражение, аппроксимирующее полученные решения:

$$f'_{max} = 0,7377 \cdot Pr^{-0,2369} \quad (8)$$

То есть скорость убывает с увеличением числа Pr по степенному закону.

Используя результаты решений дифференциальных уравнений (6)-(7), были найдены массовый расход, безразмерная средне-интегральная температура вдоль центральной линии над линейным источником для теплового и динамического слоев. Полученные решения приведены ниже в графической и аналитической форме:

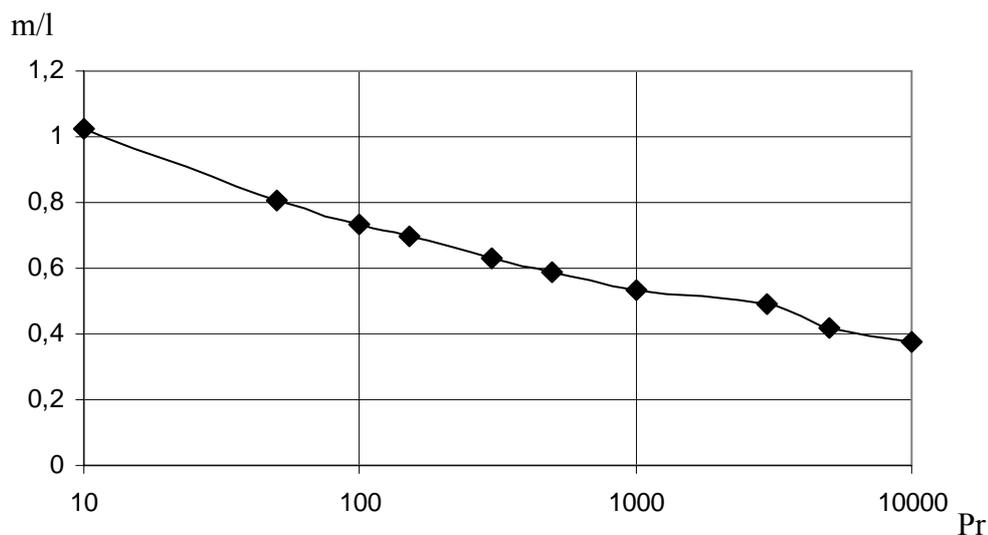


Рис. 4. Зависимость линейного массового расхода от числа Прандтля.

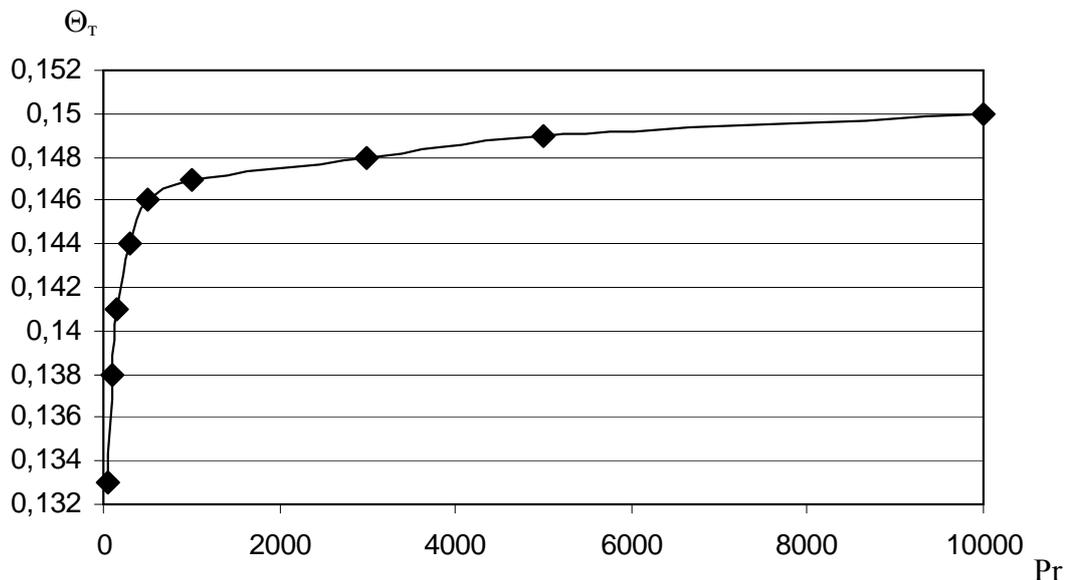


Рис.5. Зависимость средне-интегральной безразмерной температуры от числа Pr для теплового слоя.

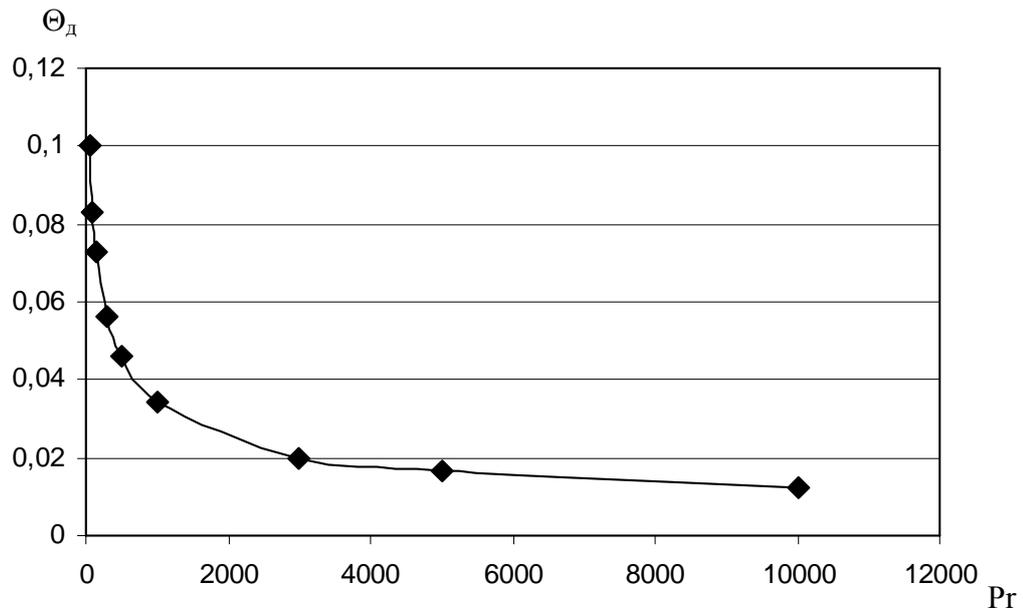


Рис.6. Зависимость безразмерной средне-интегральной температуры от числа Pr для динамического слоя.

Уравнение, аппроксимирующее решение, представленное на рис.4:

$$\frac{m}{l} = 1.3799 \cdot \text{Pr}^{-0.1399} \quad (9)$$

Согласно выражению (9), единичный массовый расход убывает с увеличением числа Pr по степенному закону.

Выражение, аппроксимирующее решение, представленное на рис.5:

$$\theta_T = 0.126 \text{Pr}^{0.0201} \quad (10)$$

Уравнение, аппроксимирующее решение, представленное на рис.6:

$$\theta_D = 0.5533 \text{Pr}^{-0.4104} \quad (11)$$

Анализируя выражения (10) и (11), видно, что безразмерные температуры динамического и теплового слоев ведут себя диаметрально противоположно. С ростом числа Прандтля одна растет, а другая наоборот - уменьшается.

Обыкновенные дифференциальных уравнений (1)–(3), полученные для степенного закона распределения избыточной температуры, приводит к системе обыкновенных дифференциальных уравнений к виду:

$$f''' + \frac{3}{5} f f'' - \frac{1}{5} f'^2 + \theta = 0 \quad (12)$$

$$\theta'' + \frac{3}{5} \text{Pr} [f \theta + f \theta'] = 0 \quad (13)$$

с граничными условиями:

$$\eta=0, f(0) = f''(0) = \theta''(0) = 0,$$

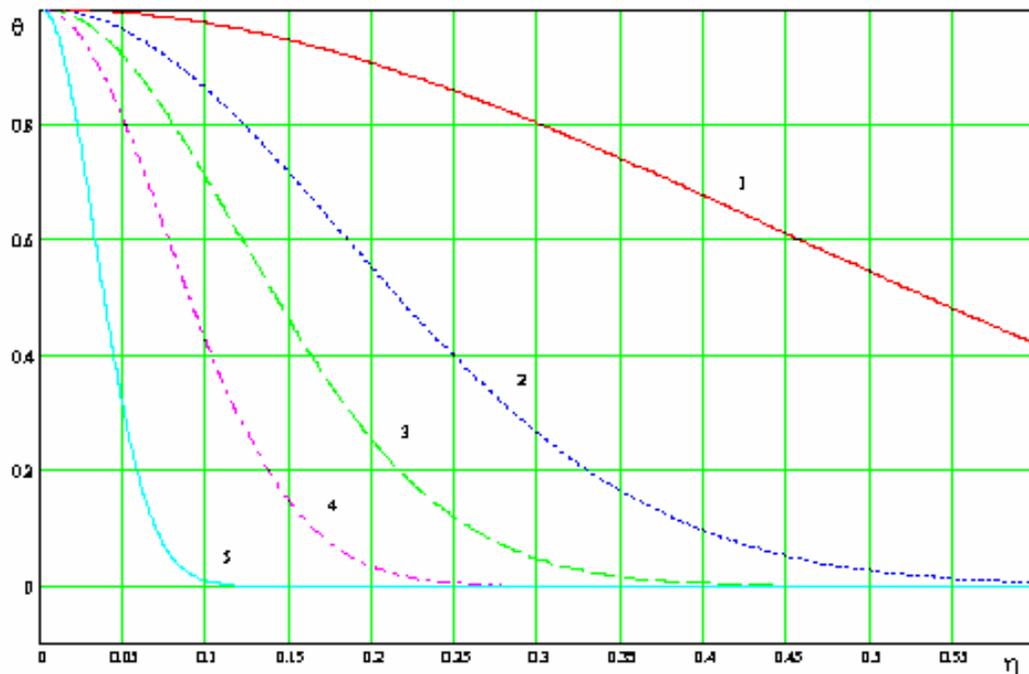


Рис.7. Рассчитанные профили температуры.
 1 - Pr=10, 2 - Pr=100, 3 - Pr=300, 4 - Pr=1000, 5 - Pr=10000

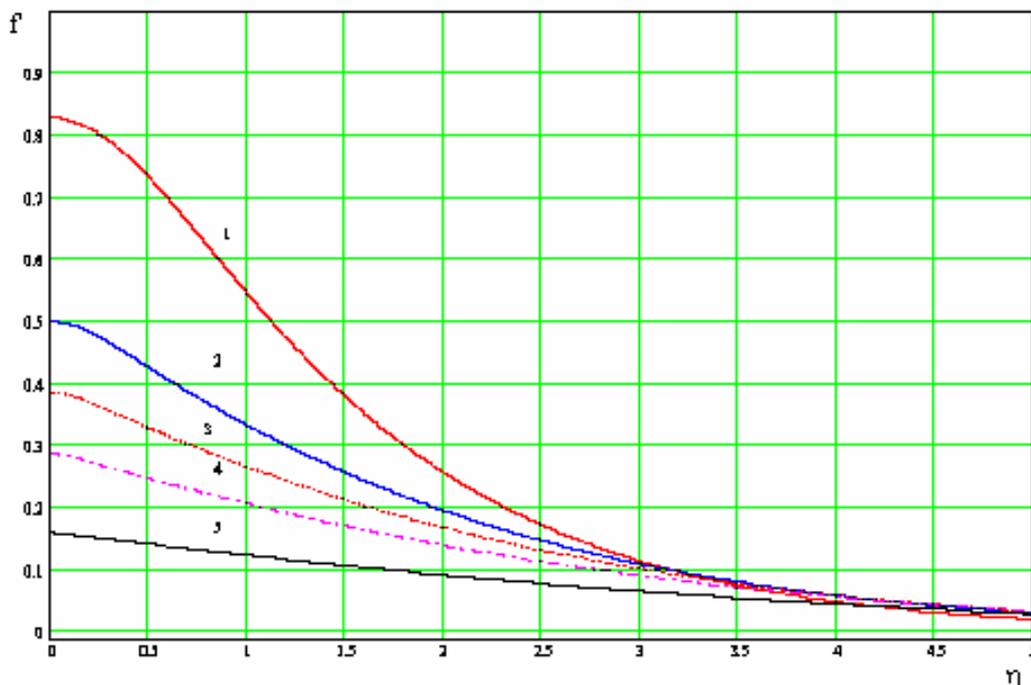


Рис.8. Рассчитанные профили скорости для двумерного факела.
 1 - Pr=10, 2 - Pr=100, 3 - Pr=300, 4 - Pr=1000, 5 - Pr=10000

По результатам анализа рис.7 и рис. 8 можно сделать вывод, что профили скорости при увеличении числа Прандтля становятся менее заполненными (более пологими), при этом уменьшается максимальная скорость. Профили температуры наоборот, становятся более крутыми. Так же необходимо отметить, что профили температуры с ростом числа Прандтля постепенно деформируются, на них появляется точка перегиба, кривые приобретают S-образную форму, которая становится все более

выраженной. В отличие от температуры, профили скорости теряют свою S – образность и постепенно «вытягиваются» в линию.

Используя данные решений дифференциальных уравнений (12) – (13) была получена зависимость максимальной скорости на центральной линии факела, образующегося над линейным источником, изображенная на рис.9.

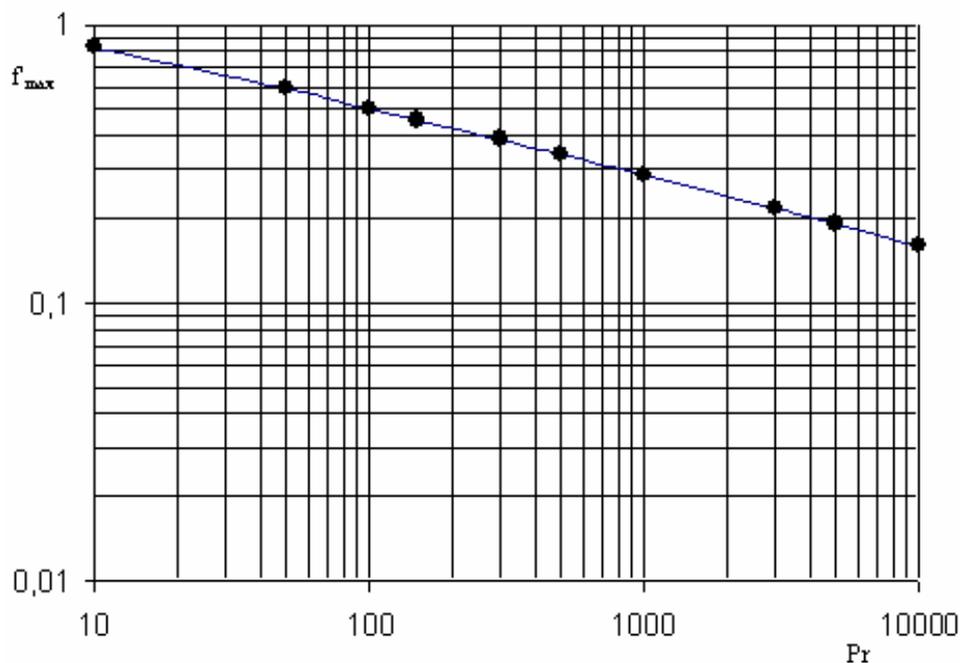


Рис.9. Зависимость максимальной скорости от числа Прандтля.

Уравнение, аппроксимирующее решение, представленное на рис.9:

$$f'_{max} = 1,4925 \cdot Pr^{-0,2401} \quad (14)$$

То есть скорость убывает с увеличением числа Pr по так же степенному закону, как и для случая с заданной температурой поверхности нагревателя (8). При этом показатель степени в выражениях (8) и (14) отличается не значительно, а множитель перед числом Прандтля отличается вдвое.

Аналогично случая использования в качестве источника подогрева источника с заданной температурой поверхности для нагревателя с заданным тепловым потоком, используя результаты решений дифференциальных уравнений (12)-(13), были найдены массовый расход, безразмерная средне-интегральная температура вдоль центральной линии над линейным источником для теплового и динамического слоев. Полученные данные приведены ниже:

m/l

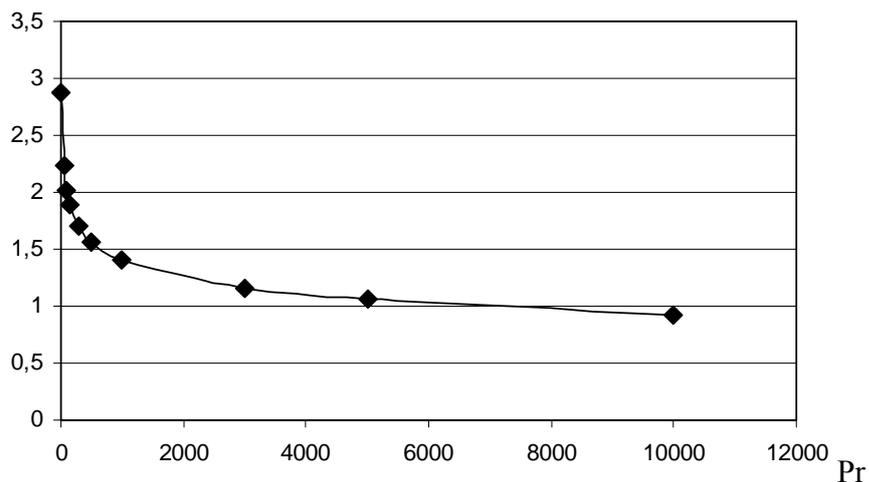


Рис.10. Зависимость линейного массового расхода от числа Прандтля.

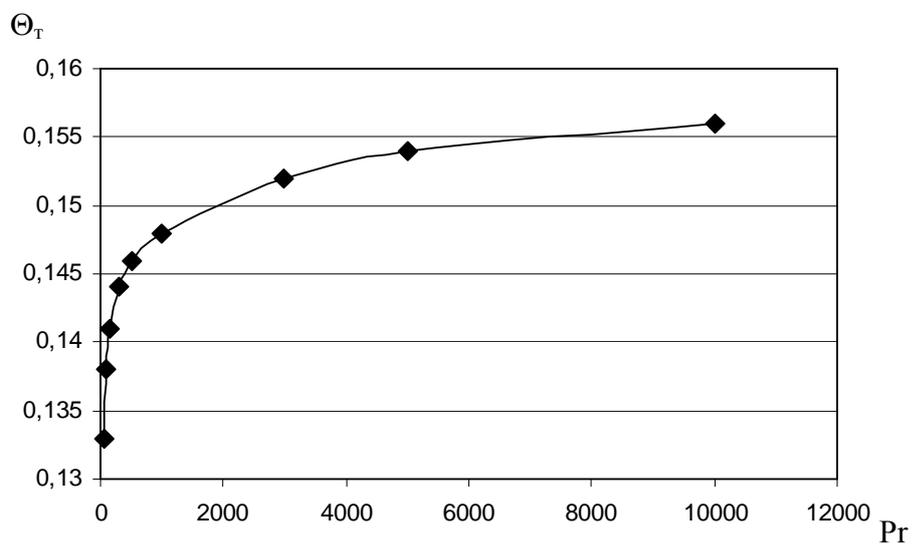


Рис.11. Зависимость безразмерной средне-интегральной температуры от числа Pr для теплового слоя.

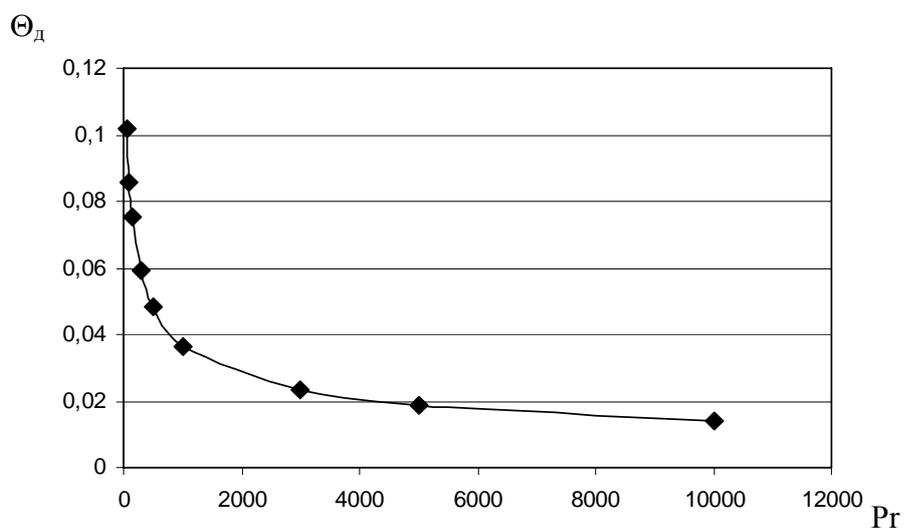


Рис.12. Зависимость безразмерной средне-интегральной температуры от числа Pr для динамического слоя.

Уравнение, аппроксимирующее решение, представленное на рис.10:

$$\frac{m}{l} = 4.1729 \cdot \text{Pr}^{-0.1629} \quad (15)$$

Уравнение, аппроксимирующее решение, представленное на рис.11:

$$\theta = 0.1214 \text{Pr}^{0.0282} \quad (16)$$

Уравнение, аппроксимирующее решение, представленное на рис.12:

$$\theta = 0.507 \text{Pr}^{-0.3858} \quad (17)$$

Анализируя выражения (16) и (17), видно, что безразмерные температуры динамического и теплового слоев ведут себя диаметрально противоположно. С ростом числа Прандтля одна растет, а другая наоборот - уменьшается. Что наблюдалось и для случая с заданной температурой поверхности нагревателя.

При этом точность всех расчетов, приведенных выше, составляет не менее 98%.

Анализ полученных результатов

Полученные результаты согласуются с уже ранее известными решениями [3] для малых чисел Прандтля (до 100), что свидетельствует об их достоверности.

На основе полученного можно сделать следующие выводы:

- с ростом числа Прандтля средняя безразмерная температура теплового слоя увеличивается, а средняя температура динамического слоя наоборот уменьшается.
- линейный массовый расход при росте числа Прандтля также уменьшается, при этом массовый расход от нагревателя с заданным тепловым потоком больше, чем от нагревателя, для которого известна температура поверхности.
- средне-интегральные безразмерные температуры, как теплового слоя, так и динамического слоев практически не зависят от типа нагревательного элемента (разница менее 1 %)

Выводы

Таким образом, зная массовый расход, температуру жидкости на определенной высоте и распределение энтальпии в следе над нагревательным элементом, полученные данные позволяют определить основные технические параметры системы подогрева нефтепродуктов, а именно: количество нагревателей, их температуру (плотность теплового потока), расположение; на какой высоте необходимо производить отбор уже подогретой жидкости и др. При этом процесс будет организован оптимально эффективно (обеспечение производственного цикла с минимально возможными потерями).

Зависимости найдены для широкого диапазона чисел Прандтля, что существенно расширяет область применения результатов исследования.

Литература

1. Патент на полезную модель №65622. Устройство для нагревания нефтепродуктов. Селиванов Н.В., Головчун С.Н.
2. Селиванов Н.В., Головчун С.Н. Тепломассообмен и гидродинамика в следе над линейным источником тепла. Сборник материалов докладов «Проблем тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении» 5 школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова. Стр. 53-56.
3. Джалурия Й. Естественная конвекция: тепломассообмен.- М:Мир,1983. Стр. 130-139.