

## Режимы установления течения аномально термовязкой жидкости в зависимости от интенсивности теплообмена

Киреев В.Н., Урманчев С.Ф.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования процесса втекания несжимаемой жидкости с немонотонной зависимостью вязкости от температуры в канал, на стенках которого теплообмен реализуется в соответствии с граничными условиями третьего рода на основании закона конвективного теплообмена Ньютона–Рихмана. В зависимости от числа Нуссельта изучены режимы установления потока в канале. Выявлены четыре типа переходных процессов, соответствующих различным уровням интенсивности теплообмена.

**Ключевые слова:** термовязкая жидкость, теплообмен, число Нуссельта, ламинарное течение, режимы установления, неустановившиеся процессы

### 1. Введение

Первыми публикациями, в которых отмечена необходимость использования зависимости вязкости жидкости от температуры, следует считать работы Л.С. Лейбензона [1], посвященные движению нефти по трубам с учетом тепла, образующегося за счет пристеночного трения или с учетом охлаждения нефти при теплообмене с окружающей средой. В дальнейшем аналогичные работы были выполнены Б.С. Петуховым и его сотрудниками при расчетах теплообменных систем энергетических установок с высокими плотностями теплового потока [2]. В этих и во многих других работах, посвященных исследованию течения жидкостей с переменной вязкостью, рассматривались монотонно убывающие зависимости вязкости от температуры. Однако, некоторые вещества, способные в жидком состоянии к процессам полимеризации и деполимеризации на определенном температурном интервале, могут иметь немонотонную температурную зависимость вязкости. Например, такие свойства имеют жидкая сера и различного рода полимерные жидкости. Следует отметить, что многие особенности

течения такого рода жидкостей к настоящему времени изучены не были. В работах [3, 4] впервые были определены основные закономерности установившегося течения жидкости с модельными зависимостями вязкости от температуры при граничных условиях первого рода, соответствующих заданию постоянной температуры на стенках плоского канала.

### 2. Математическая модель

Систему уравнений течения термовязкой жидкости (с произвольной зависимостью вязкости от температуры, в том числе немонотонной) в плоском канале большого удлинения (рис. 1) в безразмерном виде можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u^2) + \frac{\partial}{\partial y} \left( uv - \frac{1 + Av(T)}{\text{Re}} \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\varepsilon^2 \text{Eu} \frac{\partial p}{\partial x},$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (uv) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v^2 - \frac{1 + Av(T)}{\text{Re}} \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\text{Eu} \frac{\partial p}{\partial y},$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (uT) + \frac{\partial}{\partial y} \left( vT - \frac{1}{\text{Pe}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0,$$

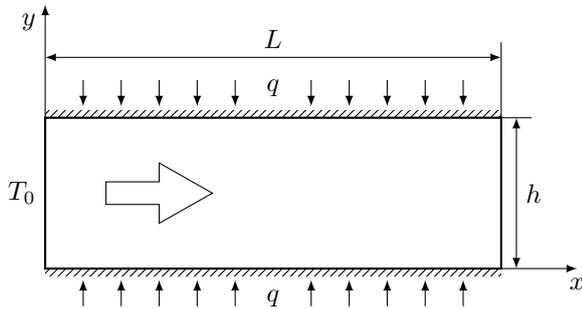


Рис. 1. Схема расчетной области

где  $u, v$  — продольная и поперечная составляющие вектора скорости жидкости в канале;  $p$  — давление;  $T$  — температура;  $\epsilon = \frac{h}{L}$  — отношение ширины канала к его длине;  $Re = \frac{h v_0}{\nu_{min}}$  — число Рейнольдса;  $Eu = \frac{p_{in}}{\rho v_0^2}$  — число Эйлера;  $Pe = \frac{h v_0}{\alpha_{max}}$  — число Пекле;  $A = \frac{\nu_{max}}{\nu_{min}} - 1$  — параметр, характеризующий степень зависимости вязкости от температуры.

Граничные условия в соответствии с физической постановкой задачи примут вид:

- на входе ( $x = 0$ ) и на выходе ( $x = 1$ )

$$p|_{x=0} = 1, \quad T|_{x=0} = 1, \quad p|_{x=1} = 0;$$

- на стенках канала ( $y = 0$  и  $y = 1$ )

$$u|_{y=0} = u|_{y=1} = 0, \quad v|_{y=0} = v|_{y=1} = 0, \\ \frac{\partial T}{\partial y}|_{y=0} = Nu \cdot T, \quad \frac{\partial T}{\partial y}|_{y=1} = -Nu \cdot T,$$

где  $Nu = \frac{h^* h}{\lambda}$  — безразмерное число Нуссельта, характеризующее интенсивность теплообмена на стенках канала.

Предположим, что в начальный момент времени жидкость в канале покоится и имеет температуру, равную температуре стенок канала, то есть начальные условия в безразмерном виде можно записать как:

$$u|_{t=0} = u|_{t=1} = 0, \quad T|_{t=0} = 0.$$

Положим также, что в начальный момент времени распределение давления имеет линейный характер:

$$p|_{t=0} = 1 - x.$$

Следует отметить, что граничное условие первого рода может быть получено как предельный случай условий Ньютона–Рихмана, когда число

Нуссельта стремится к бесконечности. С физической точки зрения это соответствует заданию максимально возможного теплообмена на стенках канала.

Зависимость безразмерной вязкости от безразмерной температуры для anomalно термовязкой жидкости запишем следующим образом:

$$\nu(T) = \exp \left[ -B (T_0 - T_w)^2 \left( T - \frac{1}{2} \right)^2 \right].$$

Здесь  $B$  — расчётный параметр.

При проведении численных расчетов значения параметров, характеризующих геометрию канала, зависимость вязкости от температуры, перепад давления были выбраны такими же, как и в работе [3]:  $\epsilon = 0.01, A = 100, B = 0.01, \Delta p = 0.8$ .

### 3. Результаты численных исследований

На основании численных исследований при конечном теплообмене взаимодействие зоны anomalно вязкости со стенками канала приводит к возникновению больших напряжений сдвига и, как следствие, значительному уменьшению скорости потока.

Для рассматриваемой задачи представляет значительный интерес исследование вопроса о том, как влияет изменение условий теплообмена на стенках канала на динамику изменения расходных характеристик потока в зависимости от времени. Проведенные численные исследования выявили несколько различных режимов установления потока в зависимости от значения числа Нуссельта.

Первый режим установления течения осуществляется при слабом теплообмене, то есть при малых значениях чисел Нуссельта. Границами данного режима можно считать диапазон  $0 \leq Nu < 0.15$ . На рис. 2 показаны характерные за-

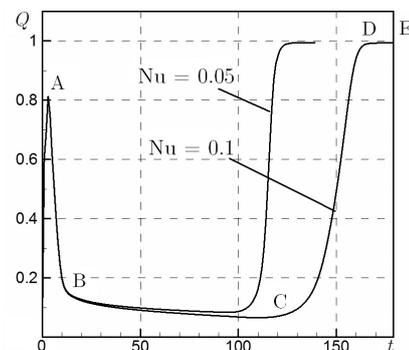


Рис. 2. Зависимость относительного расхода  $Q$  от времени для  $0 \leq Nu < 0.15$

висимости относительного расхода  $Q$  от времени из данного диапазона чисел Нуссельта.

Рассмотрим подробно случай  $Nu = 0.1$ . В начальный момент времени считаем, что весь объем жидкости в канале покоится и имеет температуру, равную температуре стенок ( $T = 0$ ). Будем также считать, что  $Q(t)|_{t=0} = 0$ .

Для того, чтобы иметь возможность детально описать зависимость относительного расхода от времени, на рис. 3 показаны графики изменения температуры и вязкости вдоль оси канала в различные моменты времени. Можно заметить, что осевое сечение вязкого барьера, изображенное сплошной линией, четко отслеживает диапазон изменения температуры, в котором определена температурная аномалия вязкости. На рис. 4 приведены поля распределения вязкости в канале в те же моменты времени, что и на рис. 3. Сопоставление изображений на этих двух рисунках дает возможность увидеть эволюцию вязкого барьера при  $Nu = 0.1$ .

Под действием приложенного перепада давления  $\Delta p$  через левое сечение канала начинает поступать нагретая жидкость с температурой  $T = 1$ . В начальные моменты времени расход увеличивается (ОА на рис. 2) до тех пор, пока формирующийся вязкий барьер не оказывает существенного влияния на характер течения. Следует отметить, что при формировании вязкого барьера значительную роль играет кондуктивная теплопроводность жидкости, которая определяет ширину вязкого барьера.

После формирования вязкого барьера скорость течения замедляется, а расход жидкости при этом резко уменьшается (АВ на рис. 2). Примерно к моменту времени  $t = 20$  вязкий барьер принимает свою характерную конфигурацию (рис. 3(а) и 4(а)).

Далее на протяжении длительного времени расход продолжает незначительно уменьшаться (ВС на рис. 2), что связано с увеличением области, занимаемой вязким барьером (рис. 3(б),(в) и 4(б),(в)).

Изменение распределения температуры свидетельствует о недостаточной интенсивности теплообмена (рис. 3). Нагретая жидкость, поступающая в канал, не успевает охлаждаться и, постепенно, вся жидкость в канале оказывается нагретой выше температуры порога образования вязкого барьера. Поэтому вязкий барьер поступательно движется под действием поля скоростей к правому сечению канала (рис. 4). Дальнейшее резкое увеличение расхода (СД на рис. 2) связано с тем, что вязкий барьер выходит за пределы канала. Таким образом, вследствие слабого теплообмена, жидкость в канале практически не охлаждается, и устанавливается режим течения с расходом, равным расходу для

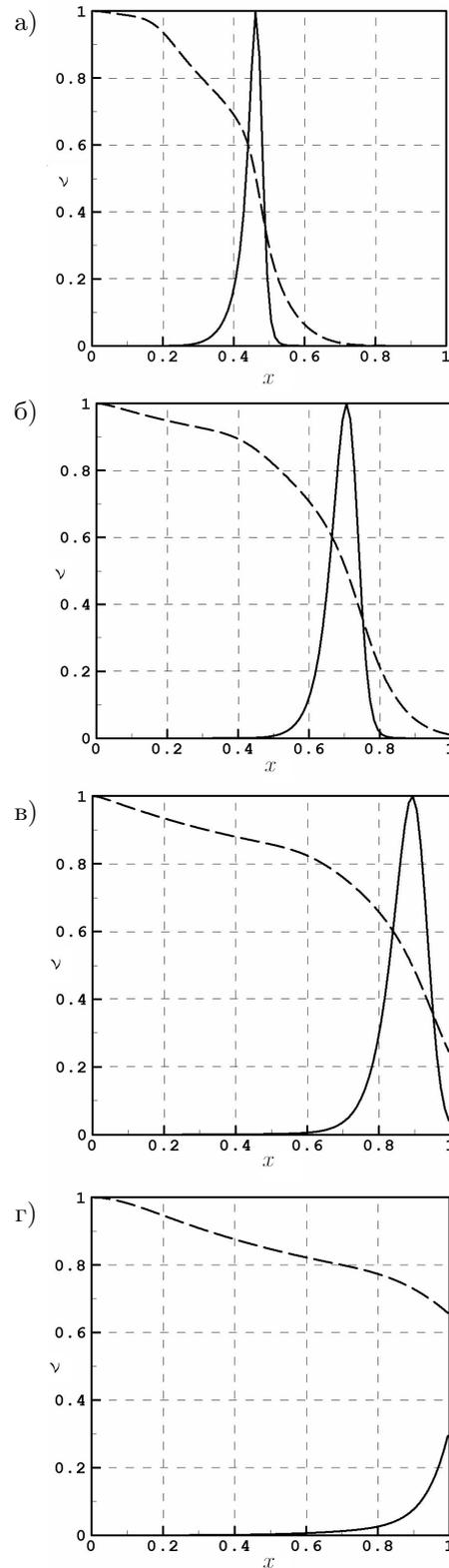


Рис. 3. Зависимость вязкости (сплошная линия) и температуры (пунктирная линия) по средней линии канала для различных моментов времени для  $Nu = 0.1$ : а)  $t = 20$ , б)  $t = 60$ , в)  $t = 100$ , г)  $t = 140$

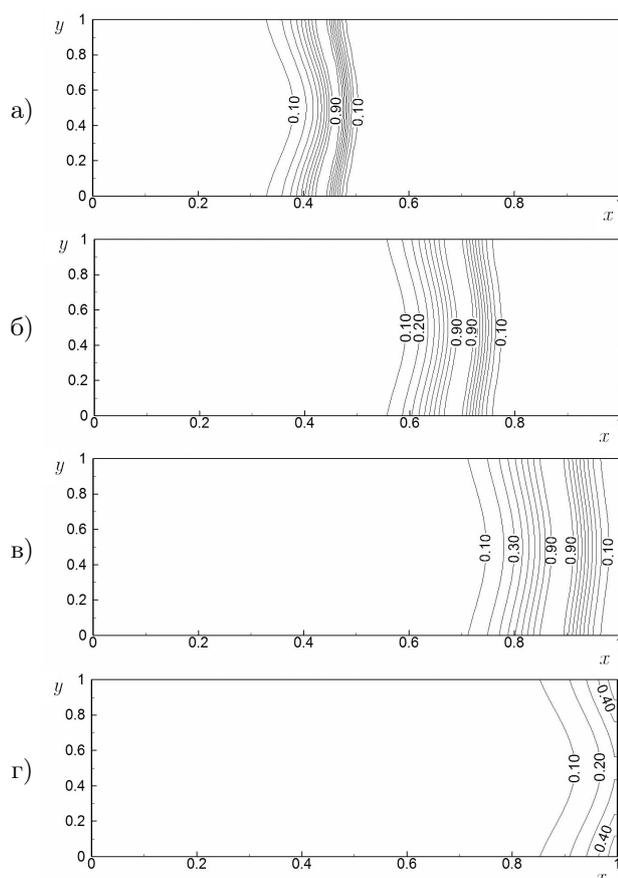


Рис. 4. Распределения вязкости в различные моменты времени для  $Nu = 0.1$ : а)  $t = 20$ , б)  $t = 60$ , в)  $t = 100$ , г)  $t = 140$

изотермического течения жидкости (DE на рис. 2).

Второй режим, который следует выделить при течении аномально термовязкой жидкости, связан с увеличением конвективного теплообмена на стенках канала и охватывает диапазон чисел Нуссельта  $0.15 \leq Nu < 0.3$  (рис. 5). В этом случае на первоначальной стадии процесса установления течения вязкий барьер повторяет характерные этапы эволюции для первого режима. При этом относительный расход на рис. 5 меняется аналогично изменению, представленному на рис. 2 во временном диапазоне от начала координат до точки С. Однако, в дальнейшем температурное поле и, следовательно, вязкий барьер устанавливаются: теплообмен с окружающей средой оказывается достаточным, чтобы на некотором расстоянии наступило динамическое равновесие конвективного и кондуктивного переноса тепла. Вязкий барьер при этом принимает фиксированный размер и местоположение. Расход жидкости устанавливается на некотором минимальном уровне, соответствующем степени взаимодействия вязкого барьера со стенками канала.

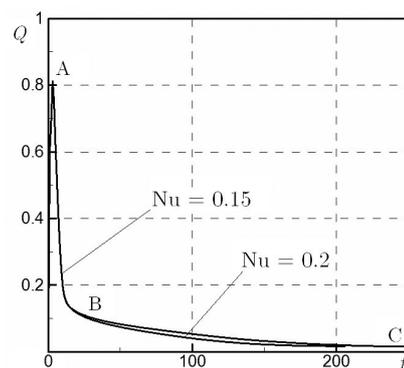


Рис. 5. Зависимость относительного расхода  $Q$  от времени для  $0.15 \leq Nu < 0.3$

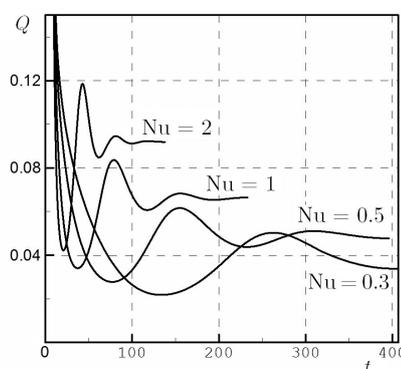


Рис. 6. Зависимость относительного расхода  $Q$  от времени для  $0.3 \leq Nu < 5$

Третий режим установления течения, который соответствует умеренному теплообмену и реализуется в диапазоне чисел Нуссельта  $0.3 \leq Nu < 5$ , можно назвать колебательным. В этом случае перед выходом на некоторое стационарное значение величина относительного расхода испытывает несколько затухающих колебаний (рис. 6). Как и для первого режима, максимумы и минимумы относительного расхода соответствуют уменьшению и увеличению области вязкого барьера (рис. 7).

И, наконец, четвертый режим установления потока аномально термовязкой жидкости реализуется при достаточно интенсивном теплообмене с окружающей средой при  $Nu \geq 5$ . На рис. 8 зависимость относительного расхода от времени показана для различных типов граничных условий для температуры: для граничного условия третьего рода ( $Nu = 10$ ) и для граничного условия первого рода (условно можно написать, что  $Nu \rightarrow \infty$ ). В этом случае относительный расход не испытывает колебаний и после формирования устойчивого вязкого барьера сразу выходит на стационарное значение.

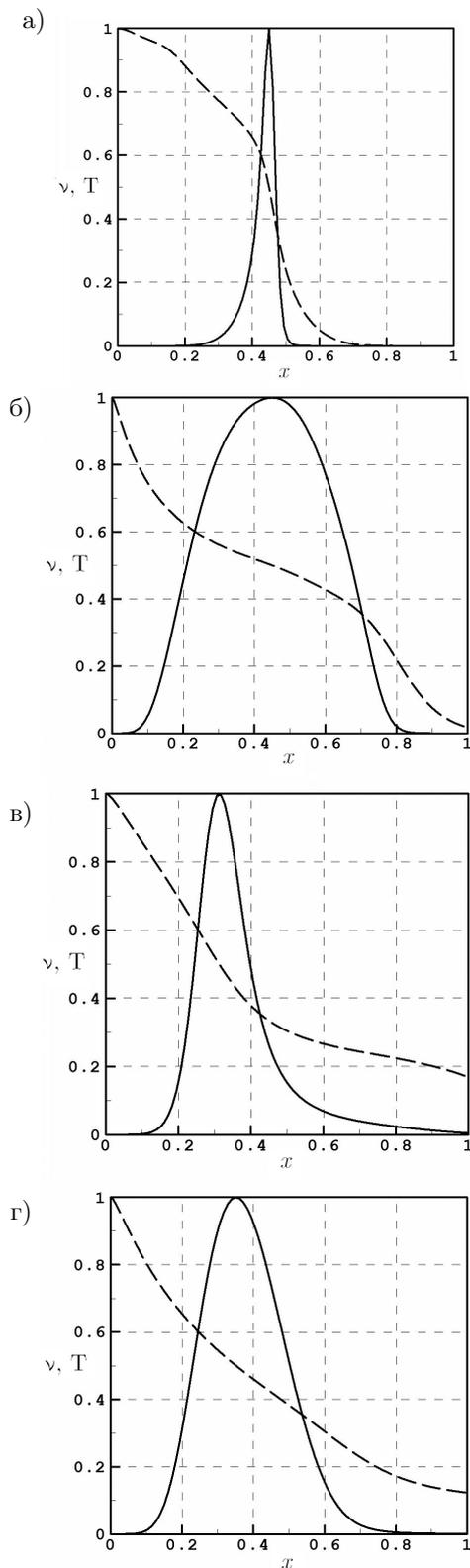


Рис. 7. Зависимость вязкости (сплошная линия) и температуры (пунктирная линия) по средней линии канала для различных моментов времени для  $Nu = 0.3$ : а)  $t = 20$ , б)  $t = 130$ , в)  $t = 260$ , г)  $t = 400$

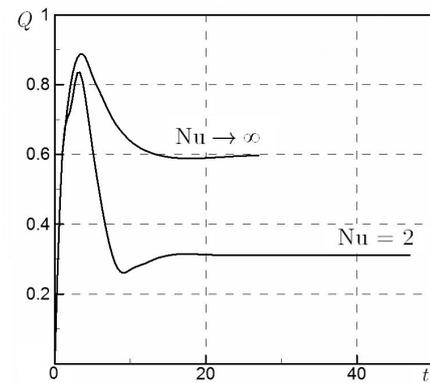


Рис. 8. Зависимость относительного расхода  $Q$  от времени для  $Nu \geq 5$

#### 4. Заключение

Таким образом, на основании проведённых численных исследований следует вывод о возможности установления процесса втекания разогретой жидкости с некоторой модельной немонотонной зависимостью вязкости от температуры в канал теплообменника по четырём сценариям. Расход при установившемся течении аномально термовязкой жидкости определяется интенсивностью теплообмена и соответствующим ему диапазоном изменений числа Нуссельта. Важно иметь в виду, что особенности рассмотренных процессов взаимодействия потока термовязкой среды с неоднородным температурным полем проявляются при ползущих течениях, характерных для полимерных жидкостей.

#### Список литературы

- [1] Лейбензон Л.С. Собрание трудов. Том III. Нефтепромысловая механика. Издательство Академии наук СССР, Москва, 1955. 680 с.
- [2] Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А., Соловьев С.Л. Теплообмен в ядерных энергетических установках: Учебное пособие для вузов. М.: Издательство МЭИ, 2003. 548 с.
- [3] Урманчиев С.Ф., Киреев В.Н. Установившееся течение жидкости с температурной аномалией вязкости // Доклады академии наук. 2004. Т. 396, № 2. С. 204–207.
- [4] Урманчиев С.Ф., Киреев В.Н. О влиянии температурной зависимости вязкости на течение жидкости // Нефтегазовое дело. 2004. № 2. С. 287–295.

## Regimes of stabilization of the flow of anomalous thermoviscous liquid depending on the heat exchange

Kireev V.N., Urmancheev S.F.

Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa

In the paper the results of numerical modeling of the flow of an incompressible fluid with a non-monotonic dependence of the viscosity on the temperature in a channel are presented. On the channel's walls the heat exchange is specified that are written mathematically in the form of the boundary conditions of the third kind on the basis of the Newton–Richman convective heat exchange law. The regimes of flow stabilization in the channel depending on the Nusselt numbers have been studied. Four different types of unsteady processes are discovered and it has been shown that they are determined by the different heat exchange intensity.

**Keywords:** thermoviscous liquid, heat exchange, Nusselt number, laminar flow, regimes of stabilisation, unsteady processes

