



О потере устойчивости течения аномально термовязкой жидкости и возникновение автоколебаний¹

Урманчиев С.Ф.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН

Исследование гидродинамических эффектов, связанных с температурной аномалией вязкости, то есть немонотонного изменения вязкости в зависимости от температуры, обусловлено необходимостью установления закономерностей течения жидкостей, как органической, так и неорганической природы, обладающих достаточно разнообразным молекулярным строением. Кроме фундаментальных аспектов, интерес к данной проблеме связан с возможностями практического применения таких жидкостей для решения различных технологических задач. Например, на основе сополимеров акриламида [1] или водных растворов метилцеллюлозы [2] созданы потокоотклоняющие реагенты для нефтедобывающей отрасли.

В представленной работе рассмотрены условия возникновения автоколебательных режимов при течении жидкости с немонотонной зависимостью вязкости от температуры) в кольцевых каналах с заданными условиями теплообмена на стенках. Течение такого рода жидкостей при наличии

градиентов температур, например, при втекании нагретой жидкости в охлаждаемый канал, сопровождается формированием вязкого барьера — локализованной области с вязкостью, соответствующей распределению температурного поля в канале. Некоторые особенности, касающиеся динамики потока в плоском канале, включая изменение расхода жидкости в зависимости от времени, впервые были описаны в статье [3]. Было выяснено, что гидродинамические параметры потока в канале определяются не только перепадом давления, но и интенсивностью теплообмена. Далее, по результатам численных исследований в работах [4] и [5] были обнаружены различные режимы ламинарного течения жидкостей с немонотонной зависимостью вязкости от температуры, определяемой гауссовой функцией, в плоском и кольцевом каналах, соответственно. В указанных работах критические условия теплообмена, при которых происходит скачкообразное изменение расхода жидкости.

Среди обнаруженных режимов наибольший интерес вызвали режимы, с осцилляционным механизмом установления потока. Естественно, возник вопрос о возможности существования и условиях возникновения неустановившихся режимов течения аномально термовязкой жидкости при задан-

¹Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 22-21-00915)

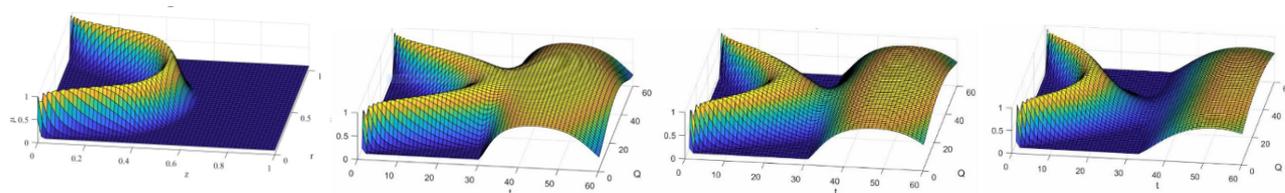


Рис. 1. Эволюция вязкого барьера при течении anomalно термовязкой жидкости в сечении кольцевого канала

ных стационарных условиях теплообмена и при фиксированном перепаде давления, в том числе и автоколебательных режимов. В этой связи, на основе анализа динамики вязкого барьера, проведённого на основе предыдущих исследований, была поставлена задача о течении anomalно термовязкой жидкости в кольцевом канале с теплообменом, скачкообразно меняющимся вдоль стенок.

В настоящей работе математическая постановка задачи предусматривала решение обобщённых уравнений Навье–Стокса с переменной вязкостью, которая задавалась аналитически в виде Гауссовой функции. Жидкость принималась несжимаемой с постоянными коэффициентами теплоёмкости и теплопроводности. Уравнения движения решались численно методом контрольного объёма совместно с уравнением неразрывности и уравнением для внутренней энергии в форме притока тепла. Граничные условия предусматривали втекание жидкости с достаточно высокой температурой, в то время как на стенках задавались условия для охлаждения потока, соответственно, с более низкой температурой. При этом в первой части ставились условия первого рода, а во второй — третьего.

При описанной постановке задачи, втекание нагретой жидкости в результате контакта с холодной жидкостью, уже содержащуюся в канале, вызывает образование вязкого барьера. Было принято во внимание, [3], что при постановке граничных условий первого рода вязкий барьер непосредственно примыкает ко входному сечению канала, а протяжённость его в процессе установления, сначала возрастает, но впоследствии может эволюционировать в зависимости от соотношения расхода и интенсивности теплообмена. При граничных условиях третьего рода, или, так называемых условиях Ньютона–Рихмана, изолинии вязкого барьера пересекают стенки канала [4] и [5], что вызывает большее сопротивление потоку со стороны вязкого барьера, так как расход напрямую связан с силами трения, возникающими на стенках канала и во втором случае их величина значительно больше.

В ходе численного моделирования удалось установить, что дальнейшие процессы определяются периодическим изменением структуры высоко-

вязкой зоны в канале. Вязкий барьер, первоначально образовавшийся в части канала с интенсивным теплообменом, перемещается вместе с потоком (Рис. 1, а). При этом в его внутренней области жидкость ещё достаточно горячая. Когда фронтальная поверхность вязкого барьера достигает отметки, где условия теплообмена резко снижаются, то, в результате возросшей роли теплообмена, создаются условия для образования высоковязкой зоны, которая охватывает значительную область второй части канала (Рис. 1, б). Этот факт, в свою очередь, приводит к резкому увеличению гидравлического сопротивления и, соответственно, уменьшению расхода. Затем теплообменные процессы инициируют восстанавливают первоначального состояния системы (Рис. 1, в). В завершение цикла происходит уменьшение температуры во второй части канала за счёт теплообмена, что приводит к снижению вязкости (Рис. 1, г) и восстановлению первоначального состояния вязкого барьера, близкого к тому, которое соответствовало начальным условиям задачи как на Рис. 2, а. После чего весь процесс повторяется, что и вызывает периодическое изменение расхода жидкости.

На Рис. 2 представлены графики, характеризующие динамику расхода жидкости при заданных параметрах поставленной задачи, это — незатухающие колебания (Рис. 2, а) и соответствующая им фазовая траектория (Рис. 2, б), которая, как и следовало ожидать, стремится к некоторой замкнутой кривой. Тот факт, что любая первоначально заданная точка на фазовой плоскости, независимо от того, находится она вовне или внутри кривой, стремится к ней, свидетельствует о том, что это — устойчивый предельный цикл.

Итак, рассмотренная здесь задача со ступенчатым изменением интенсивности теплообмена дала возможность обнаружить принципиально новый характер эволюции высоковязкой зоны. В первой половине канала интенсивность теплообмена поддерживалась максимальной, при этом для температуры ставились граничные условия первого рода. Во второй половине канала ставились условия третьего рода при различных значениях числа Нуссельта. В результате исследований были обна-

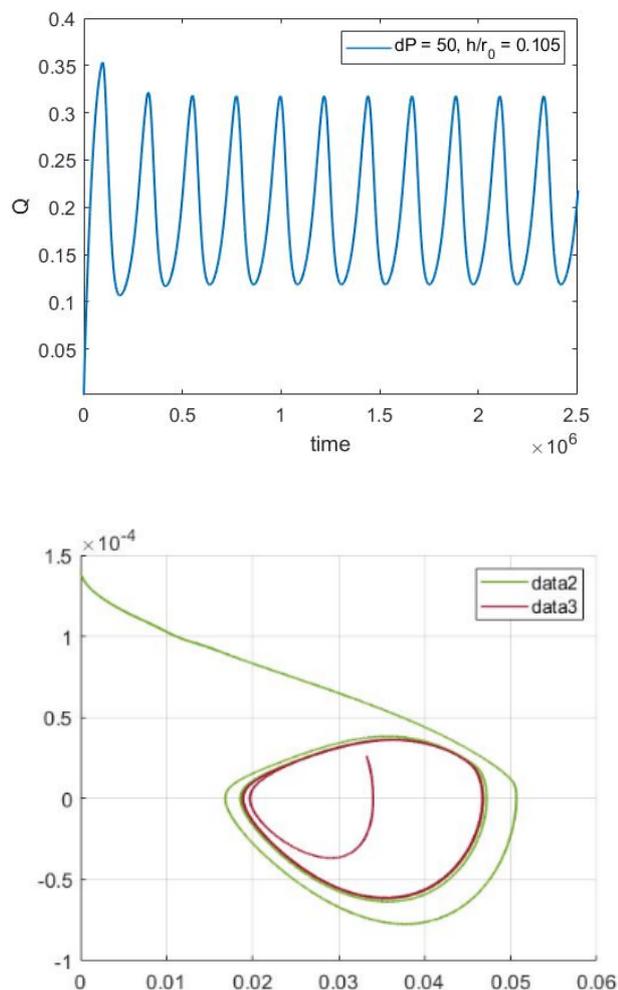


Рис. 2. Автоколебательный характер изменения расхода anomalно термовязкой жидкости в сечении кольцевого канала

ружены автоколебания, соответствующие изменению расхода жидкости. Характер осцилляций, судя по Рис. 2, а незначительно отличается гармонических, что свидетельствует об установлении нелинейных колебаний томсоновского типа [6]. Кроме того, было установлено, что область существования незатухающих колебаний определяется параметрами задачи, характеризующими перепад давления и отношение ширины канала к величине радиуса внутреннего цилиндра, а на границах указанной области замечены и слабо затухающие колебания расхода с весьма малым декрементом затухания. Таким образом, в пространстве указанных параметров мы можем выделить область, переход в которую приводит к потере устойчивости течения с постоянным расходом и вызывает периодическое изменение расхода с неизменной амплитудой.

Список литературы

- [1] Thomas A., Sahuc B., Abirov Zh., Mazbayev Ye. Polymer Flooding to Increase Oil Recovery at Light and Heavy Oil Fields // Oil and Gas Territory, 2017, No. 7–8, P. 58–67.
- [2] Алтунина Л.К., Кувшинов В.А., Кувшинов И.В., Стасьева Л.А., Чертенков М.В., Андреев Д.В., Карманов А.Ю. Увеличение нефтеотдачи пермо-карбоновой залежи высоковязкой нефти Усинского месторождения физико-химическими и комплексными технологиями (обзор) // Журнал СФУ. Химия. 2018. Т. 11. № 3. С. 462–476.
- [3] Урманчев С.Ф., Киреев В.Н. Установившееся течение жидкости с температурной аномалией вязкости // Доклады академии наук, 2004, том 396, №2, с.204–207.
- [4] Uрманчев S., Kиреев V. The Transient Flow of Liquid with Non-Monotonous Temperature Dependent Viscosity in a Plane Channel // AIP Conference Proceedings, 2017, vol. 1906, 200009. 4p. (American Institute of Physics)
- [5] Киреев В.Н., Мухутдинова А.А., Урманчев С.Ф. О критических условиях теплообмена при течении жидкости с немонотонной зависимостью вязкости от температуры в кольцевом канале // Прикладная математика и механика, 2023, том 87, № 3, с. 369–378.
- [6] Ланда П.С. Нелинейные колебания и волны. М.: Наука. Физматлит, 1997. 496 с.