

УДК 519.634

## ТЕЧЕНИЕ ТЕРМОВЯЗКИХ СРЕД

© 2011 г.

*С.Ф. Урманчеев*

Институт механики Уфимского научного центра РАН

said@anrb.ru

*Поступила в редакцию 15.06.2011*

Представлены результаты исследований течения жидких сред, вязкость которых существенно меняется в зависимости от температуры. Проведен анализ критериев подобия задачи о ламинарном течении термовязкой жидкости в области с неоднородным распределением температурного поля. Построена иерархия математических моделей для характерных предельных значений безразмерных параметров. Особо выделен класс задач с немонотонной зависимостью вязкости от температуры. Для сред, обладающих указанным свойством, предложено наименование аномально термовязких сред. Приведено численное решение ряда задач течения аномально термовязких сред в каналах с теплообменом, пористых средах, а также при естественной конвекции.

*Ключевые слова:* аномально термовязкие жидкости, математические модели, теплообмен, пористые среды, естественная конвекция.

Повышенный интерес к исследованию сред со сложными реологическими свойствами, обусловленными изменением молекулярной структуры вещества в процессе течения или при воздействии внешних полей, связан, прежде всего, с различными технологическими и медико-биологическими приложениями.

Развитию теории течения этих сред посвящен обширный список исследований, берущих начало от работ Л.С. Лейбензона, Фулчера, Эйринга и др. и продолженных в работах Б.В. Петухова и его сотрудников. В отечественной и зарубежной научной литературе достаточно широко представлены работы по гидродинамике термовязких сред с различного вида монотонно убывающими зависимостями вязкости от температуры. Следует отметить работы С.Н. Аристова, А.А. Бармина, О.Э. Мельника, А.А. Осипцова и многих других авторов.

Существует множество гидродинамических проблем, в том числе и нерешенных, для которых зависимость вязкости от температуры играет важную роль. Однако некоторые вещества, такие как жидкие сера и фосфор, а также ряд органических полимеров, например водный раствор метилцеллюлозы, имеют немонотонные зависимости вязкости от температуры. Особенности изменения вязкости этих веществ связаны с процессами полимеризации и деполимеризации молекул. Образование длинных полимерных цепочек в определенном температурном диапазоне приводит к значительному уве-

личению вязкости. Дальнейшее повышение температуры, напротив, уменьшает их длину и, соответственно, ведет к уменьшению вязкости. Закономерности течения этих сред практически не изучены и требуют адекватной постановки задачи для их теоретического и экспериментального исследования.

Необходимость изучения аномально термовязких сред приобретает особое значение в связи с тем, что большинство этих жидкостей участвует в различных технологических процессах в качестве рабочих сред. Например, в теплообменных устройствах установок Клаус-процесса, предназначенных для сжигания серного ангидрида и утилизации серы при переработке сернистой нефти. При конденсации паров серы в каналах теплообменника образуется слой жидкой серы, стекающей в накопитель. Проблема состоит в том, что с течением времени часть каналов закупоривается в результате перекрытия их сечения. В лабораторных экспериментах, выполненных под руководством В.М. Лекае, удалось установить возникновение некоего «порога» на поверхности слоя жидкой серы, развитие которого и приводит к перекрытию сечения каналов и, в конечном счете, вызывает остановку всего процесса. Объяснение причин образования и эволюции «порога» – важная прикладная задача, связанная с повышением эффективности процесса переработки нефти.

В связи с этим особый интерес вызывают со-

общения об астрофизических наблюдениях извержения вулкана на Ио – спутнике планеты Юпитер, сделанных с космического аппарата «Вояджер». Проведенный анализ свидетельствует о том, что растекающаяся лава представляет собой поток серы. Исследование Дж. Финка, С. Парка и Р. Грили было выполнено с целью определить влияние реологии жидкой серы на характер растекания лавы на основании сравнения с потоком силикатной лавы. При этом было обнаружено, что слой лавы, растекающейся по поверхности Ио, образует серию чередующихся зон с высокой и нормальной вязкостью в поперечном сечении.

Очевидное предположение о существовании связи особенностей течения некоторых жидкостей с немонотонной зависимостью их вязкости от температуры требует рационального анализа и установления взаимосвязи между количественными характеристиками гидродинамических параметров потока и теплофизических свойств жидкости.

Приведены результаты численного исследования аномально термовязкой жидкости, то есть некоторой модельной жидкости с немонотонной зависимостью вязкости от температуры.

В результате проведенных исследований показано, что особенности гидравлического сопротивления канала при протекании в нем термовязкой жидкости определяются характером пространственного распределения зон с высокой вязкостью, обусловленным процессами теплообмена через стенки канала. При течении аномально термовязких жидкостей образуется локализованная в пространстве зона с высокой вязкостью – «вязкий барьер», конфигурация которого зависит от условий теплообмена. При высокой интенсивности теплообменных процессов «вязкий барьер» имеет подковообразную форму, вытянутую по направлению потока. При низкой интенсивности теплообмена он перекрывает сечение канала, касаясь его стенок и обуславливая более значительное сопротивление потоку.

Показано, что при втекании в канал с охлаждаемыми стенками нагретой жидкости с монотонно убывающей зависимостью вязкости от температуры экспоненциального типа при определенных значениях параметров, входящих в эту зависимость, может происходить скачкообразное увеличение расхода жидкости с ростом перепада давления. Причина этого явления состоит в том, что рост перепада давления приводит к уменьшению влияния теплообмена и, соответственно, степени прогрева сечения канала. При этом происходит размыкание изолиний вязкости, и высоковязкая область потока разделяется на две

зоны, примыкающие к стенкам канала, а осевая область канала по всей его длине оказывается занятой жидкостью с температурой, близкой к исходной, и с низкой вязкостью.

При исследовании закономерностей течения аномально термовязкой жидкости в канале с высоким значением интенсивности теплообмена обнаружен эффект уменьшения относительного расхода при увеличении перепада давления. Установлено, что причина указанного эффекта заключена в увеличении области, занимаемой «вязким барьером», с ростом перепада давления до некоторого его критического значения, при котором происходит размыкание изолиний вязкости высоковязкой зоны, и дальнейшее увеличение перепада давления ведет к росту относительного расхода.

При втекании аномально термовязкой жидкости, нагретой выше температурной аномалии вязкости, в канал, содержащий ту же жидкость, при температуре стенок канала ниже температурной аномалии вязкости, обнаружена зависимость режима установления течения жидкости от интенсивности теплообмена на стенках канала. В зависимости от числа Нуссельта определены четыре возможных режима установления течения. Для рассмотренных условий и физических параметров жидкости при значениях  $Nu < 0.15$  возникает поршневой режим, при котором в силу малости теплообмена нагретая жидкость вытесняет холодную. При этом «вязкий барьер» перемещается по длине канала до выхода за его пределы, что приводит к резкому росту расхода жидкости с температурой, равной температуре втекания.

Следующий режим – режим стабилизации – происходит при  $0.15 < Nu < 0.3$ , при котором движение «вязкого барьера» прекращается, а расход жидкости оказывается на минимальном уровне. При  $0.3 < Nu < 5.0$  возникает колебательный режим изменения расхода жидкости по времени. При больших значениях числа Нуссельта течение устанавливается с величиной расхода, соответствующей случаю граничных условий первого рода.

Численное исследование расслоенного режима течения двух несмешивающихся вязких жидкостей, одна из которых имеет температурную аномалию вязкости, позволило установить наличие порога на границе раздела жидкостей, форма и величина которого существенно зависят от интенсивности теплообмена на стенках канала. Образование порога связано с обтеканием «вязкого барьера» в аномально термовязкой жидкости и наблюдалось в лабораторных экспериментах по

течению слоя жидкой серы.

При исследовании конвективных течений аномально термовязких сред установлено, что изменение интенсивности теплообмена в зависимости

от числа Грасгофа определяется некоторым эффективным значением вязкости и имеет те же структуры конвективных течений, которые характерны для жидкостей с постоянной вязкостью.

## FLOW OF THERMOVISCOUS FLUIDS

*S.F. Urmancheev*

The results of the study of fluid flows with viscosities varying considerably as a function of the temperature are presented in the report. The analysis of similarity criteria in the problem of thermoviscous fluid laminar flow in the area with a non-uniform distribution of temperature field is carried out. The hierarchy of mathematical models for the characteristic limiting values of the dimensionless parameters is constructed. The class of problems with non-monotonic dependence of viscosity on temperature is marked out particularly. The media with the abovementioned property are named «abnormally thermoviscous liquids». Examples of numerical analysis of some problems of abnormally thermoviscous liquid flows in channels with heat exchange, porous media, as well as natural convection are given.

*Keywords:* abnormal thermoviscous liquids, mathematical models, heat exchange, porous media, natural convection.