

УДК 532.546.6:536.12

DOI: 10.17223/00213411/64/3/148

А.И. ФИЛИППОВ^{1,2}, Н.А. СПИРИДОНОВА²

НЕРАВНОВЕСНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СИЛЬНО ДИССИПАТИВНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Рассмотрено развитие теории неравновесных полей давления и температуры в двухфазных термодинамических системах, моделирующих природные коллекторы нефти и газа. Такие системы отнесены к сильно диссипативным, поскольку процесс течения сопровождается преобладающим действием сил внутреннего трения. Проведённые исследования позволили существенно уточнить представления о термодинамических процессах и установить новые физические закономерности формирования температурных эффектов при фильтрации жидкости в реальных пористых средах. Показано, что максимальные значения температурного эффекта не достигают величины интегрального эффекта Джоуля – Томсона при любых значениях параметров среды и жидкости, а в реальных коллекторах нефти и газа температурные изменения на несколько порядков меньше предсказываемых на основе равновесной теории.

Ключевые слова: термодинамическая система, неравновесный диссипативный процесс, законы сохранения, фильтрация, закон Дарси, баротермический эффект.

Введение

Исследование неравновесных термодинамических процессов в природных и технических системах представляет актуальную научную проблему в связи с многочисленными приложениями. Основные принципы исследования неравновесных процессов представлены в научных работах И. Пригожина и др., а также изложены в современных учебниках [1, 2]. Согласно этим принципам, исследование конкретных задач требует использования нелинейных уравнений, методы решения которых недостаточно развиты.

Данная работа посвящена исследованию неравновесных физических эффектов, возникающих при течении в многофазных сильно диссипативных термодинамических системах. Предположительно первые научные работы в этой области выполнены Дж. Джоулем и У. Томсоном в 1852–1862 гг., в результате которых обнаружен неравновесный необратимый эффект, названный их именем [3]. Практический интерес к этому эффекту усилился в связи с работами П.Л. Капицы [4] по физике низких температур. Возможность получения низких температур обусловлена тем, что в докритической области большинство природных газов при течении через пористую перегородку охлаждаются. В жидкостях же аналогичное течение приводит к разогреву и по этой причине должного отношения к данной проблеме не было.

Внимание к этим процессам, видимо, впервые было обращено в работах учёных Калифорнийского технологического института (Sage B.H., Lacey W.N. [5]), которые экспериментально определили величину коэффициента Джоуля – Томсона для некоторых природных углеводородов в связи с приложениями в нефтегазодобыче. Работы по данной тематике были продолжены Б.Б. Лапуком [6] и в дальнейшем существенно развиты Э.Б. Чекалюком [7] в связи с идеей о возможности термодинамического зондирования и определения физических параметров удалённых от скважины зон пласта на основе измерения температуры в скважине. Недостатком этих работ является точка зрения, заключающаяся в том, что регистрируемые эффекты не сильно отличаются от эффекта Джоуля – Томсона, что привело в последующем к противоречиям [8].

В настоящее время проблема актуализировалась также в связи с тем, что разработаны высокочувствительные и прецизионные термометры, разрешающая способность которых приближается к тысячным долям градуса. Это создаёт принципиально новые возможности для развития методов промысловой геофизики, реализация которых требует создания теории неравновесных процессов, что осуществлено в настоящей работе на основе уравнений неравновесной термодинамики, предложенных И. Пригожиным и др. [1, 2]. При этом использованы развитые ранее представления об адиабатическом процессе и процессе Джоуля – Томсона.

Отметим, что для реализации адиабатического процесса в термодинамической системе необходимо обеспечить условия, когда молекулярным переносом можно пренебречь, а систему считать

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала
«Известия высших учебных заведений. Физика»
осуществляется на платформе
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>