

ЭВОЛЮЦИОННАЯ ДИНАМИКА МНОГОМАСШТАБНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЯХ В ПОРИСТЫХ И СТРУКТУРИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

В.В. Кузнецов

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
630090, г. Новосибирск, Россия*

Двухфазные (двухжидкостные) течения в пористых средах и структурированных системах являются основным гидродинамическим объектом при добыче нефти и газа, геотермальных и других природных процессах, в нефтехимической и криогенной промышленности. При закачке воды в нефтяные и газовые пласты в хаотических системах каналов сложной формы возникает малоизученный класс течений, для которого капиллярные и вязкие силы определяют движение межфазных границ на масштабах одиночной поры и большого ансамбля пор. Исследование топологии таких течений необходимо для развития технологий добычи нефти и газа [1, 2]. Другим важным примером являются двухфазные газожидкостные течения в колоннах, заполненных структурированными насадками, которые являются основой криогенного разделения газов и нефтехимического синтеза. Эти процессы, требующие значительных энергетических затрат, характеризуются изменением состава смеси газов и увеличением плотности газа по высоте колонны. Следовательно, поток газа может стать неустойчивым и в колонне возникнет опускное течение [3]. В данной работе рассмотрены процессы самоорганизации двухфазного газожидкостного течения в пористых средах и структурированных насадках, которые сопровождаются развитием капиллярной, вязкостной и конвективной неустойчивости, образованием микромасштабных и крупномасштабных структур, определяющих эффективность различных технологических процессов.

Для изучения микроструктуры двухфазных течений в пористых средах использована прозрачная модель пористой среды с объемными порами [2]. Поровое пространство образовано двумя стеклянными пластинами, плотно прижатыми шероховатыми поверхностями друг к другу, и имеет хаотическую микроструктуру с распределением сужений и расширений пор по размерам. Опыты по вытеснению модели нефти водой показали, что движение фронта вытеснения в пористой среде на микромасштабе происходит в виде случайного скачкообразного движения межфазной границы, контролируемого капиллярными силами, с прорывом в соседнюю пору, что обуславливает развитую поверхность

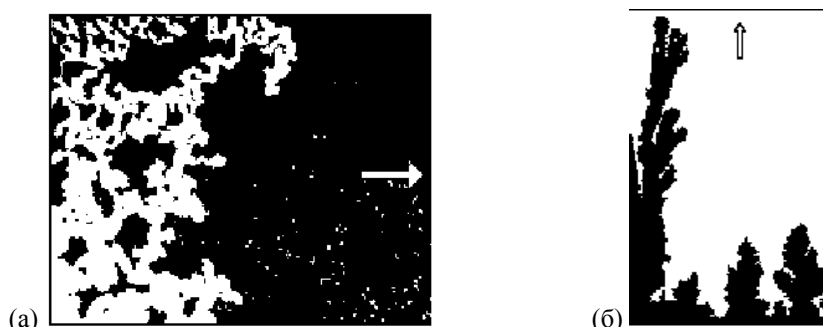


Рис.1. Капиллярная неустойчивость при вытеснении воды ундеканом (а) и вязкостное языкообразование при отношении вязкостей вытесняемой и вытесняющей жидкости 4.7 (б).

контакта фаз, показанную на рис. 1 (а). В процессе вытеснения при развитии капиллярной неустойчивости на фронте развиваются микроязыки, связность проводящего кластера нарушается и он распадается на изолированные кластеры различного размера, образующие «неизвлекаемые» углеводороды. Получено, что с ростом капиллярного числа фрактальная размерность границы не изменяется, а масштаб самоподобия уменьшается, достигая размера поры. Это показывает, что капиллярные силы полностью контролируют движение межфазной границы внутри области самоподобия и, если ее размер существенно превышает размер одиночной поры, на фронте вытеснения развиваются перколяционно-подобные кластеры двух фаз, что определяет границы применимости широко используемой равновесной модели Маскета – Леверетта.

При вытеснении вязкой жидкости водой в пористой среде фронт вытеснения теряет устойчивость на макромасштабе, и образуются крупномасштабные языки вытесняющей фазы. В условиях, когда размер области самоподобия порядка размера поры, капиллярные силы определяют движение фронта на микромасштабе и генерируют шум, а вязкие силы – на макромасштабе и определяют глобальную неустойчивость течения. Типичная структура языков вытесняющей фазы при вытеснении вязкого масла водой в прозрачной модели пористой среды показана на рис. 1 (б). Развитие языков определяется их взаимодействием и ветвлением при наличии конечно амплитудных возмущений. На начальной стадии ветвление языков отсутствует, происходит подавление медленно растущих языков и увеличение ширины быстро растущих. Капиллярная неустойчивость на микромасштабе генерирует возмущения поля скорости и надкритические бифуркации вызывают ветвление языков при их ширине больше порогового значения.

Несмешивающееся вытеснение при малых скоростях фильтрации в пористой среде характеризуется тем, что размер области самоподобия существенно превышает размер одиночной поры. В этих условиях вязкостная неустойчивость деформирует поле изолиний постоянной насыщенности вытесняющей жидкости. Как показали расчеты вытеснения в рамках модели Маскета-Леверетта, деформация поля изолиний сосредоточена, главным образом, в окрестности фронта вытеснения, и за фронтом вытеснения она мала. Поэтому с ростом амплитуды языка возрастают капиллярные перетоки от его головной к хвостовой части, скорость роста языка снижается и возможно установление его предельной длины. Аналитически получено соотношение, определяющее предельную длину языка в зависимости от функциональных параметров модели и параметров вытеснения. Подобное соотношение для предельной длины языка при стабилизированном капиллярными перетоками вытеснении получено аналитически и подтверждено численно для вытеснения в слоистой пористой среде, когда происходит преимущественное движение фронта вытеснения в пропластке с большей проницаемостью.

Основной причиной спонтанной самоорганизации противоточного газожидкостного многокомпонентного течения с образованием крупномасштабных структур в процессе разделения смеси газов в сложных канальных системах дистилляционных колонн со структурированными насадками является каскад многомасштабных процессов, возникающих в колонне с отрицательным градиентом плотности газа. Численные расчеты разделения смеси фреонов R21-R114 в колонне, заполненной структурированной насадкой Koch 1Y, выполненные на основе одномерной неравновесной модели неэквивалентного разделения показали, что наибольший градиент концентрации легколетучего компонента сосредоточен в верхней части колонны. Градиент концентрации возрастает при увеличении отношения мольных расходов жидкости и пара от 1 до 1.7, рис. 2 (а), что может служить причиной развития конвективных течений в поле силы тяжести.

Рассмотрим влияние отрицательного градиента плотности смеси газов вдоль вектора силы тяжести на устойчивость течения в колонне в приближении Буссинеска и

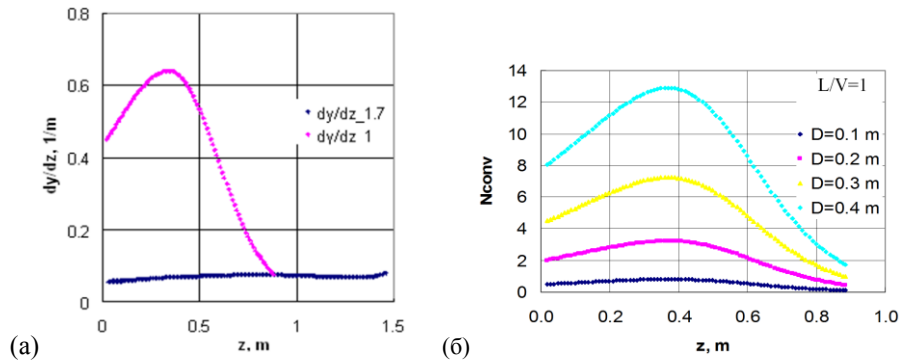


Рис. 2. Изменение градиента концентрации легколетучего компонента (а) и числа конвекции (б) по высоте колонны.

предположим малое изменение плотности смеси газов по высоте колонны:

$$\rho = \rho_0 + \rho', \quad \rho = \rho_0(1 - \beta_Y Y'), \quad \beta_Y = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial Y}, \quad (1)$$

где $Y = Y_0 + Y'$ - концентрация легколетучего компонента. Обезразмерим уравнение движения для приведенной скорости газа \mathbf{u}_g в колонне по характерному размеру l , характерной скорости газа U_g , характерной концентрации $Y_0 = l \cdot dY/dz$ и получим:

$$(\tilde{\mathbf{u}} \nabla) \tilde{\mathbf{u}} = -\alpha_p \frac{\nabla \tilde{p}}{\tilde{\rho}_0} - N_{conv} \tilde{Y}' \frac{\mathbf{g}}{g} + \frac{1}{\text{Re}} \Delta \tilde{\mathbf{u}} \quad (2)$$

Здесь введен безразмерный параметр, определяющий соотношение гравитационных и инерционных сил при конвективном течении (число конвекции):

$$N_{conv} = \frac{l^2 g \beta_Y dY_0/dz}{U_g^2} = \frac{Ra \cdot Pr}{Pe^2}. \quad (3)$$

На рисунке 2 (б) показано изменение числа конвекции N_{conv} вдоль координаты, отсчитываемой от верхнего края колонны, для отношения мольных расходов жидкости и пара, равного 1. При расчете рассматривались возмущения, характерный размер которых порядка диаметра колонны. Как видно, число конвекции для таких возмущений значительно превышает единицу для колонн с диаметром, превышающим 0.2 метра. Для таких колонн можно ожидать возникновение опускного конвективного течения в верхней части колонны и значительную неоднородность концентрации легколетучего компонента по сечению колонны, что и наблюдалось экспериментально в [3].

Работа выполнена в ИТ СО РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-49-00010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах, М.: Недра, 1984, 211 с.
2. Накоряков В.Е., Кузнецов В.В. Капиллярные явления, тепломассообмен и волновые процессы при двухфазном течении в пористых системах и засыпках // ЖПМТФ. 1997. Т. 38, №4. С. 155–166.
3. Pavlenko A., Zhukov V., Pecherkin N., Chekhovich V., Volodin O., Shilkin A., Grossmann C. Investigation of flow parameters and efficiency of mixture separation on a structured packing // AIChE Journal. 2014. Vol. 60, P. 690–705.