

# МНОГОМАСШТАБНЫЕ ПРОЦЕССЫ САМООРГАНИЗАЦИИ ТЕЧЕНИЙ И МЕЖФАЗНЫЙ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ПОРИСТЫХ И МИКРОСТРУКТУРНЫХ СИСТЕМАХ

В.В. Кузнецов

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе  
Сибирского отделения Российской академии наук  
630090, Новосибирск, Россия*

В последнее время наблюдается революционное развитие микротехнологий в различных областях техники и производится широкий спектр устройств с размерами элементов от десятков микрон до единиц миллиметров [1]. На основе микроструктурных систем создаются перспективные технологии отвода экстремально больших потоков тепла в ограниченном объеме, которые используются в высокоэффективных системах охлаждения энергетического оборудования, лазерных зеркал и компьютерных процессоров, микропарогенераторах и конденсаторах водородной и альтернативной энергетики [2, 3]. Двухфазные течения в пористых средах с хаотическими системами микроканалов являются основным гидродинамическим объектом при добыче нефти и газа, геотермальных и других природных процессах. Ключевую роль в обосновании эффективного применения двухфазных микроструктурных устройств и современных технологий нефтегазодобычи играют фундаментальные закономерности многомасштабных процессов самоорганизации газожидкостных течений и тепломассопереноса при фазовых переходах, представленные в данной работе.

Рассмотрена капиллярная гидродинамика и тепломассоперенос при кипении и конденсации и испарении в микроканальных системах тепломассообменных устройств водородной и альтернативной энергетики. Газожидкостное течение в микроканалах, поперечный размер которых много меньше капиллярной постоянной  $\delta_c = \sqrt{2\sigma/g(\rho_f - \rho_g)}$ , характеризуется определяющим влиянием капиллярных сил на режим течения. Здесь  $\sigma$  – поверхностное натяжение,  $\rho$  – плотности жидкости и газа,  $g$  – ускорение силы тяжести. Для таких каналов предложен метод расчета границы кольцевого течения, учитывающий доминирование капиллярных сил. Он основан на предположении, что устойчивое кольцевое течение возникает, если трение на границе раздела фаз способно перемещать жидкость в виде пленки, и переход к такому течению соответствует равенству толщины пленки при кольцевом течении и толщины пленки за жидкой перемычкой. Расчеты по предложенной модели хорошо соответствуют экспериментальным данным.

Развита модель теплообмена при фазовых превращениях в прямоугольных микроканалах. Модель основана на выделении течения жидкости в углу канала, ограниченного межфазным мениском, и пленочного течения на стенке. После получения решений в этих областях, они согласовываются на линии сопряжения. Уравнения движения дополнены кинематическим условием на поверхности жидкости и граничными условиями и интегральным уравнением сохранения массы для системы пленка-мениск. Для пленочного течения при  $\varepsilon = \delta_0/a \ll 1$ , где  $\delta_0$  – начальная толщина пленки жидкости и  $a$  – половина ширины длинной стороны канала, уравнения Навье-Стокса сводятся к уравнению:

$$(\gamma m^3 + 1.5 \frac{K}{\varepsilon} m^2)_x + (m^3 m_{yyy})_y = \frac{3}{\varepsilon^4} (Ga \frac{m_y}{m})_y - \frac{G_0 \Theta_{wi}}{m \varepsilon}, \quad (1)$$

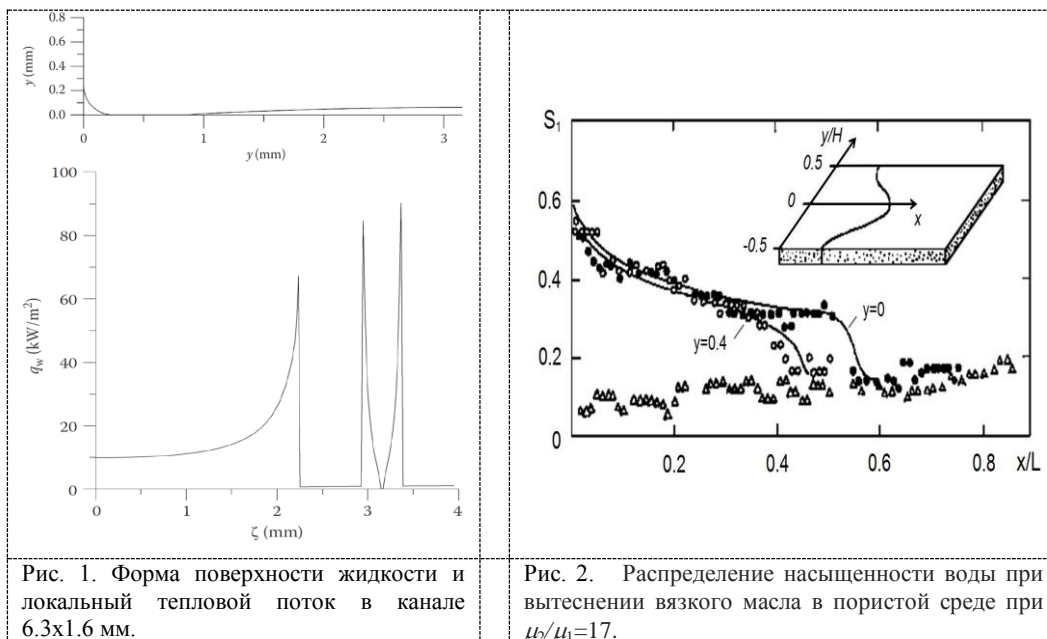


Рис. 1. Форма поверхности жидкости и локальный тепловой поток в канале 6.3x1.6 мм.

Рис. 2. Распределение насыщенности воды при вытеснении вязкого масла в пористой среде при  $\mu_2/\mu_1=17$ .

где  $\gamma = 1 - (dp_g/dx)/\rho_f g$ ,  $\kappa = \pm \tau/\rho_f g a$ ,  $Bo = \rho_f g a^2/\sigma$ ,  $Ga = A_0/(6\pi a^2 \sigma)$ . Здесь  $m = \delta/\delta_0$  – толщина пленки, продольная  $x$  и поперечная  $y$  координаты обезразмерены на  $aBo/\varepsilon$  и  $a$ ,  $\tau$  – трение на поверхности жидкости,  $G_0 = \lambda_f T_* v_f / (h_{fg} \sigma a)$ ,  $\Theta_{w,i} = (T_{w,i} - T_s)/T_*$ ,  $A_0$  – константа Гамакера,  $h_{fg}$  – скрытая теплота парообразования,  $T_{w,i}$  – внутренняя температура стенки и  $T_s$  – температура насыщения. Характерная температура  $T_*$  определяется разностью температуры внешней стенки и насыщения. Поток массы на межфазной поверхности определяется по модели кондуктивного переноса тепла в пленке:  $G_{film} = \lambda_f (T_{w,i} - T_s) / (\delta h_{fg})$ . При численном моделировании определяется момент разрыва пленки и установления новой конфигурации, состоящей из ривулетов, менисков и сухих пятен. После нахождения межфазной поверхности, уравнения теплопроводности для жидкости и стенки решаются совместно. На рис. 1 показана форма поверхности жидкости и распределение локального теплового потока по периметру канала при испарении хладона R-21 для массовой скорости  $G = 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . Расчет показывает формирование сухих пятен и увеличение коэффициента теплоотдачи в окрестности контактной линии. Получено, что формирование сухих пятен и увеличение коэффициента теплоотдачи в микрообласти вблизи контактной линии типичны для самоорганизации течения при испарении жидкости в микроструктурных системах. Принципиально другой характер имеет самоорганизация течения при конденсации пара, когда максимальный поток конденсата наблюдается в области сверхтонкой пленки жидкости и выравнивает межфазную поверхность.

Особенностью активных микроканальных систем охлаждения и микропарогенераторов являются экстремальные удельные тепловые потоки, вызывающие кипение жидкости и кризисные явления. Рассмотрены закономерности кипения в условиях вынужденной конвекции в микроструктурных системах, полученные в широком диапазоне массовых расходов и приведенных давлений, обсуждена связь теплоотдачи и режима течения теплоносителя. Основываясь на физических механизмах фазовых переходов и критических явлений в микроканальных системах, установленных для широкого класса хладонов

и диэлектрической жидкости перфторгексан, а также результатах численного моделирования процессов тепломассообмена, разработан новый метод расчета теплоотдачи, учитывающий совместно вклад подавления пузырькового кипения, двухфазной вынужденной конвекции и испарения сверхтонкой пленки жидкости.

Для изучения процессов самоорганизации двухжидкостных течений при несмешиваемом вытеснении в пористой среде применены прозрачная модель с хаотической системой объемных пор и уплотненная засыпка кварцевого песка. Как показали эксперименты, при вытеснении углеводородных жидкостей водой, в результате развития капиллярной неустойчивости на микромасштабе, на фронте вытеснения развивается перколяционный кластер и связность углеводородной жидкости нарушается, образуя «неизвлекаемые» углеводороды. При несмешиваемом вытеснении вязкой жидкости менее вязкой жидкостью фронт вытеснения теряет устойчивость на макромасштабе, и образуются крупномасштабные структуры вытесняющей фазы в виде проникающих языков. На рис. 2 показано распределение насыщенности вытесняющей фазы (воды) при вытеснении вязкого масла в пористой среде при  $\mu_2/\mu_1=17$  в уплотненной засыпке кварцевого песка. Распределения водонасыщенности по длине пористой среды приведены для головной части языка ( $y/H=0$ ) и при  $y/H=0.4$ . Здесь  $H$  и  $L$  соответствуют ширине и длине образца пористой среды, соответственно. Экспериментальные данные были получены с использованием добавки контрастного вещества в воду и применением гамма-камеры для регистрации интенсивности излучения. В условиях, когда размер области самоподобия существенно превышает размер одиночной поры, вязкостная неустойчивость деформирует поле изолиний насыщенности вытесняющей жидкости. Поэтому с ростом деформации фронта вытеснения возрастают поперечные капиллярные перетоки, подавляющие развитие крупномасштабных структур и стабилизацию длины языка. Аналитически получено соотношение, определяющее предельный размер деформации фронта в зависимости от функциональных параметров модели и параметров вытеснения. Показано, что для вытеснения нефти в слоистых пластах, основным механизмом, препятствующим прорыву воды в добывающие скважины, являются капиллярные перетоки между пропластками.

Полученные результаты позволяют количественно охарактеризовать сложную картину многомасштабных процессов самоорганизации газожидкостных и двухжидкостных течений в микроструктурных и пористых системах, что необходимо для разработки высокоэффективных компактных тепломассообменных аппаратов и современных технологий добычи нефти и газа.

Исследование выполнено в ИТ СО РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10519).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Abramson A.R., Tien C.L.** Recent Developments in Microscale Thermophysical Engineering // J. Microscale Thermophys. Eng. 1999. Vol. 3, No. 4. P. 229–244.
2. **Kuznetsov V.V.** Heat and Mass Transfer with Phase Change and Chemical Reactions in Microscale // Intern. Heat Transfer Conf. IHTC14: Proc. Washington, 2010. IHTC14-22570.
3. **Kuznetsov V.V., Shamirzaev A.S.** Experimental study of heat transfer of dielectric liquid perfluorohexane at flow-boiling in a microchannel heat exchanger // J. Engineering Thermophysics. 2017. Vol. 26, No. 2. P. 146–153.