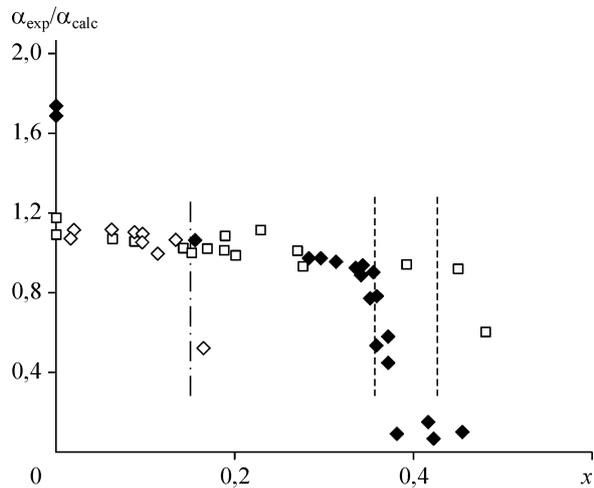


### **Программа 3.2.2. Турбулентный и ламинарный теплоперенос в неоднородных средах, в том числе мини- и микроканалах, в нестационарных условиях и условиях термодинамической неравновесности (координатор акад. В. Е. Накоряков)**

В Институте теплофизики им. С. С. Кутададзе экспериментально получены закономерности подавления пузырькового кипения при движении воды и хладонов в микроканалах. Кипение движущейся жидкости в каналах с поперечным размером меньше капиллярной постоянной характеризуется определяющим влиянием капиллярных сил и эффектов стес-

ненности на режим течения и теплообмена. В данной работе экспериментально изучены теплообмен при кипении хладона R318C в кольцевом канале с зазором 900 мкм в диапазоне массовых скоростей от 10 до 800 кг/(м<sup>2</sup>·с) и тепловых потоков до 90 кВт/м<sup>2</sup> и теплообмен при кипении воды в микроканальном теплообменнике с зазором 600 мкм. Опыты проведены



**Рис. 9.** Относительный коэффициент теплоотдачи в зависимости от массового паросодержания. Точки — эксперимент (♦ —  $G = 250 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ,  $P = 3,5 \text{ бар}$ ; □ —  $G = 250 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ,  $P = 5,5 \text{ бар}$ ; ◇ —  $G = 800 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ,  $P = 5 \text{ бар}$ ); линии — рассчитанные граничные паросодержания.

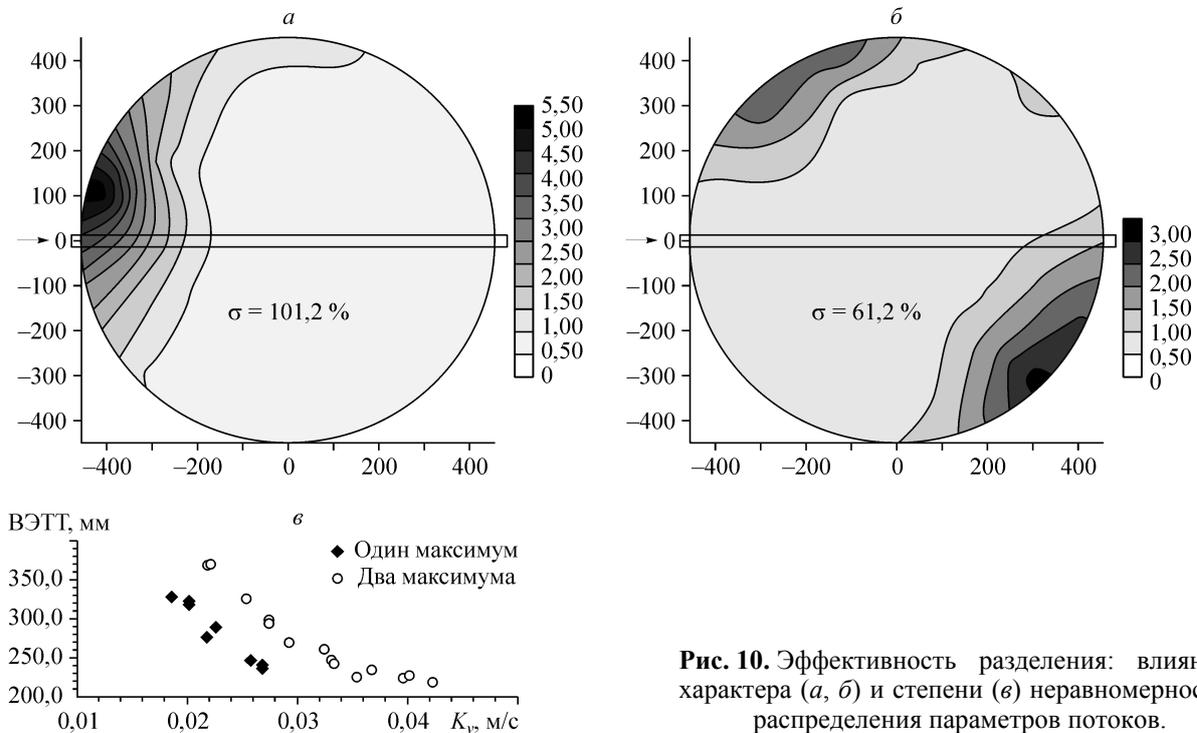
при начальном недогреве и при фиксированном начальном паросодержании на входе в канал. Хладон R318С и вода в каналах большого размера имеют определяющий вклад пузырькового кипения в общий теплообмен. Получены данные по структуре течения и локальным коэффициентам теплоотдачи, в том числе в режиме ухудшения теплообмена. Для каналов

с размером порядка капиллярной постоянной обнаружена область подавления пузырькового кипения и перехода к режиму испарения сверхтонких пленок жидкости.

Построена модель подавления кипения, учитывающая влияние режима течения и условий зарождения центров кипения в тонких пленках жидкости. Получено, что в микроканалах с размером существенно меньше капиллярной постоянной пузырьковое кипение полностью подавлено и основным механизмом теплообмена является испарение на деформированной капиллярными силами межфазной поверхности.

На рис. 9 показаны опытные данные по коэффициенту теплоотдачи при кипении движущегося хладона R318С в кольцевом канале с зазором 1000 мкм, отнесенному к рассчитанному по модели Liu Winterton, в зависимости от массового паросодержания. Линии показывают граничные паросодержания, рассчитанные по предложенной модели подавления пузырькового кипения. Работа важна для развития основ физики фазовых переходов на микромасштабах.

В том же Институте в результате проведенного цикла экспериментальных исследований на уникальном крупномасштабном стенде «Большая фреоновая колонна», предназначенном для изучения гидродинамики и тепломас-



**Рис. 10.** Эффективность разделения: влияние характера (а, б) и степени (в) неравномерности распределения параметров потоков.

сообщена при дистилляции смесей в регулярных канальных системах, впервые получены опытные данные по одновременному измерению полей температур, концентраций и локальных расходов по сечению и высоте колонны в режиме разделения смесей в широких диапазонах изменения режимных параметров.

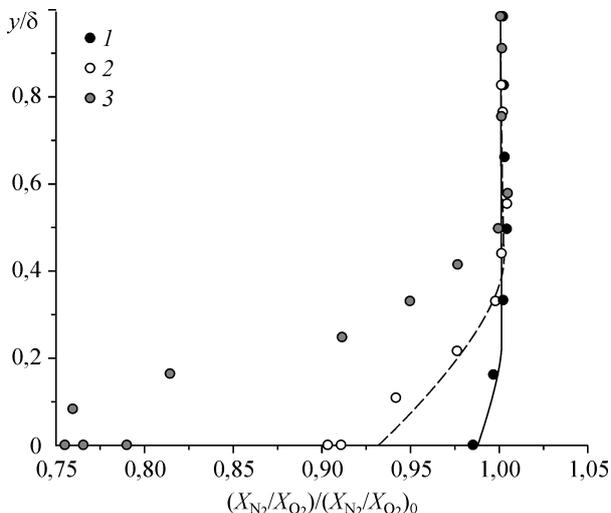
Показано, что внутри структурированной насадки по поперечному сечению возникают градиенты температур и концентраций, сравнимые по масштабу с полным концентрационным напором между верхом и низом колонны (рис. 10). Разработаны методы снижения влияния негативных факторов, связанных с развитием крупномасштабной и мелкомасштабной (обусловленной возникновением сухих пятен) неравномерностей, на эффективность разделения.

Полученные результаты важны для углубления понимания процессов разделения смесей с использованием регулярных канальных систем, верификации расчетных моделей с целью повышения эффективности разделения и производительности колонн различного назначения, служат основой для разработки новых подходов и методов при конструировании высокоэффективных разделительных колонн.

В том же Институте экспериментально обнаружен и подтвержден результатами численного моделирования эффект разделения компонентов воздуха (азота и кислорода) в ламинарном пограничном слое на проницаемой пластине при вдуве гелия. По результатам экспериментов получено, что относительное увеличение объемной концентрации кислорода вблизи проницаемой поверхности может достигать 25 %.

С физической точки зрения эффект разделения объясняется нарушением закона Фика в многокомпонентных газовых смесях с различными диффузионными свойствами компонентов. Численное исследование различных моделей многокомпонентной диффузии (Вильке, Рамшоу, Лапина и др.) показало, что результаты, соответствующие экспериментальным данным, можно получить только на основе соотношений Максвелла—Стефана для диффузионных потоков компонентов смеси (рис. 11).

Для численного анализа эффекта разделения компонентов воздуха (азота и кислорода) в водородо-воздушном потоке в качестве вдуваемого инертного газа был выбран неон, поскольку коэффициенты бинарной диффузии неона в компоненты водородо-воздушной смеси различаются существенно больше, чем коэффициенты бинарной диффузии гелия. Пока-



**Рис. 11.** Изменение параметра разделения компонентов воздуха (азота и кислорода) по толщине пограничного слоя при вдуве гелия в воздух.

Точки — эксперимент, линии — результаты численного моделирования. Вдув гелия в воздух.  $u_0 = 4$  м/с.  $j_{ст}$ , кг/(м<sup>2</sup>·с): 1 —  $3,34 \cdot 10^{-3}$ ; 2 —  $10,9 \cdot 10^{-3}$ ; 3 —  $17,4 \cdot 10^{-3}$ .

зано, что наличие водорода в воздухе приводит к усилению эффекта разделения и к увеличению относительной концентрации кислорода вблизи пористой поверхности.

В том же Институте разработан стробоскопический PTV-видеоэндоскоп «ЗОНД-01» (рис. 12) для визуализации и прецизионного бесконтактного измерения поля скорости потоков. В прибор впервые скомбинированы методы и техника оптической эндоскопии, методы стробоскопической визуализации и трековые полевые методы, реализованные на новейшей элементной базе — мощных полупроводниковых зеленых лазерах с двойным преобразованием частоты и сверхминиатюрных видеосенсорах высокого разрешения. Прибор найдет применение для прецизионных оптических измерений многофазных потоков в экспериментальных исследованиях и приложениях.



**Рис. 12.** Стробоскопический PTV-видеоэндоскоп «ЗОНД-01». Внешний вид.