

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ СООСНЫХ ПОТОКОВ В МОДЕЛЯХ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

М. М. Кузьма, И. В. Минеев

ФГБОУ ВО Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

## Введение

В настоящее время, при проектировании различных элементов энергетического оборудования и фрагментов проточных частей установок, большое внимание уделяется вопросам перемешивания рабочих сред. При этом наиболее часто рассматривается задача обеспечения наиболее полного турбулентного перемешивания потоков жидкостей или газов. Однако существует ряд установок, в оборудовании которого необходимо обеспечить противоположный процесс, т. е. создать такие условия, чтобы несколько потоков жидкостей или газов, отличающихся температурами, химическим составом или концентрациями переносимых примесей, имели наименьшую степень перемешивания на проектируемом участке. При этом движение потоков может осуществляться по подводящим к зоне смешения каналам различных геометрий, обусловленных конструктивными особенностями используемого оборудования.

Анализ зарубежной [1–5] и отечественной литературы показал, что исследования процессов смешения с внешним подводящим каналом, имеющим квадратное сечение, практически отсутствуют. Поэтому, задавшись целью дополнить экспериментальную базу в этой области, возникла необходимость в проведении исследования процессов смешения, причем, за исходную была принята геометрия с подводом к исследуемому участку типа «круглая труба в квадратном канале» (рис. 1).

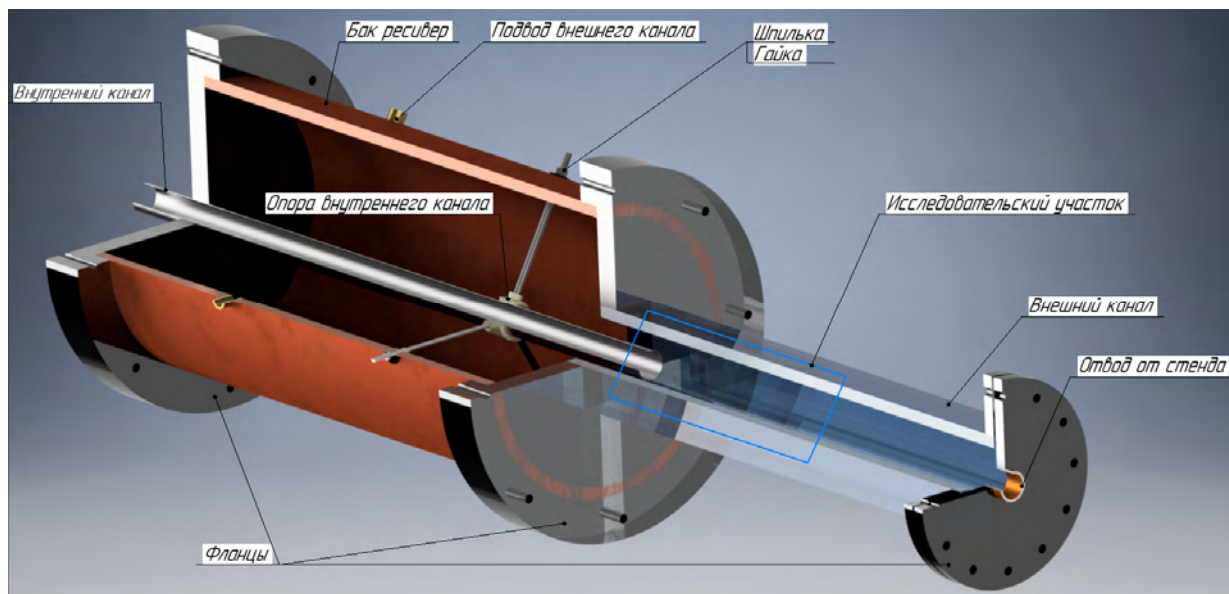


Рис. 1. Модель основного исследовательского участка и подводящих к нему устройств

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Разработка стенда

Для осуществления данного исследования было необходимо создание материально технической базы – двухконтурного экспериментального стенда с принудительной циркуляцией в обоих

контурах, который получил в дальнейшем название **ФТ-18**. В рамках создания данного стенда было необходимо выполнить гидравлический расчет трассы циркуляции, для подбора основного оборудования – насосов, трубопроводов и арматур.

Для проведения гидравлического расчета была составлена упрощенная гидравлическая схема основного контура циркуляции (рис. 2). Далее эта схема разбивалась на характерные участки, на каждом из которых определялась величина перепада давления, расходуемая на преодоление трения и местных сопротивлений. Общее значение перепада давления определялось как сумма перепадов по всем рассмотренным участкам. Расчетные соотношения для определения коэффициентов гидравлического сопротивления на трение и коэффициентов местных гидравлических сопротивлений выбирались из справочника по гидравлическим сопротивлениям [6] для каждого рассматриваемого участка.

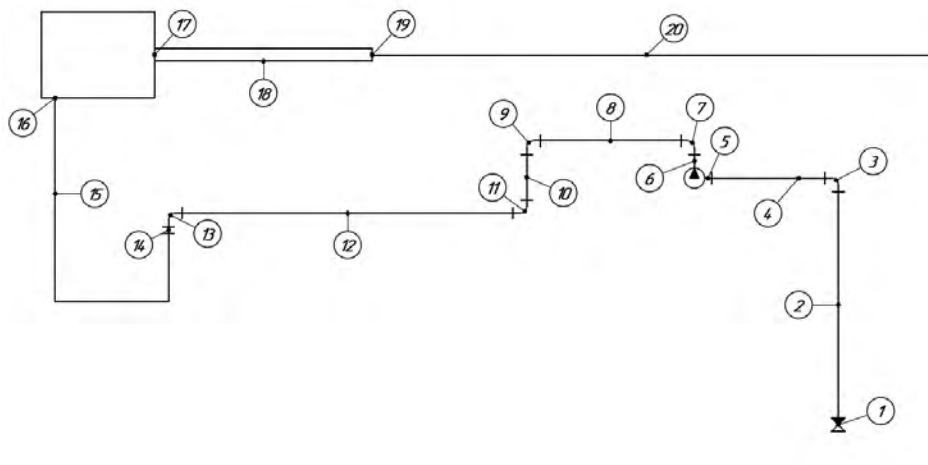


Рис. 2. Расчетная схема для определения гидравлических потерь основного контура стенда ФТ-18

Падение давления на участке: 1 – обратный клапан; 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15 – вязкое трение в трубопроводе; 3, 7, 9, 11, 13 – резкий поворот трубопровода на 90°; 5 – резкое сужение перед насосом; 14, 19 – резкое сужение перед гибким шлангом; 15, 20 – вязкое трение в гибком шланге 16 – вход в успокоительный бак; 17 – резкое сужение после успокоительного бака; 18 – вязкое трение в экспериментальной трубе.

Полученное расчетное значение суммарного перепада давления с учетом инженерного запаса, обусловленного погрешностями расчетных формул и упрощенной расчетной схемой, увеличивалось на 20 %.

В результате гидравлического расчета получена гидравлическая характеристика трассы экспериментального стенда  $\Delta P_{\Sigma}(Q)$ , приведенная в табл. 1 и представленная на рис. 3 (синяя кривая, (1)).

#### Результаты гидравлического расчета

| Расход рабочей среды $Q, \frac{m^3}{c}$ (л/мин) | Расчетное суммарное значение потерь давления $\Delta P_{\Sigma}$ , Па | Суммарное значение потерь давления с учетом коэффициента запаса 20 % $\Delta P_{\Sigma}$ , Па |
|---|---|---|
| 0,0025 (150)                                    | 245984,3  | 296000,1  |
| 0,00125 (75)                                    | 68828,3   | 81870,3   |
| 0,00083 (49,8)                                  | 32858,1   | 38818,1   |
| 0,00063 (37,8)                                  | 19499,4   | 22924,5   |
| 0,0005 (30)                                     | 13031,5   | 15262,6   |
| 0,00042 (25,2)                                  | 9386,5  | 10959,7   |
| 0,00036 (21,6)                                  | 7110,5  | 8281,9  |
| 0,00031 (18,6)                                  | 5599,7  | 6507,5  |
| 0,00028 (16,8)                                  | 4538,3  | 5263,6  |
| 0,00025 (15)                                    | 3762,2  | 4355,7  |

По полученной гидравлической характеристике контура по каталогам подбирался насос. Для обеспечения заданных по техническому заданию значениям режимных параметров рабочей среды был выбран центробежный одноступенчатый насос DAB KI 30/120M. На рис. 3 представлено наложение гидравлических характеристик выбранного насоса и циркуляционного контура и отмечена рабочая точка. Расход в рабочей точке составил 0,00215 м<sup>3</sup>/с (129 л/мин), напор 22 м (216 кПа).

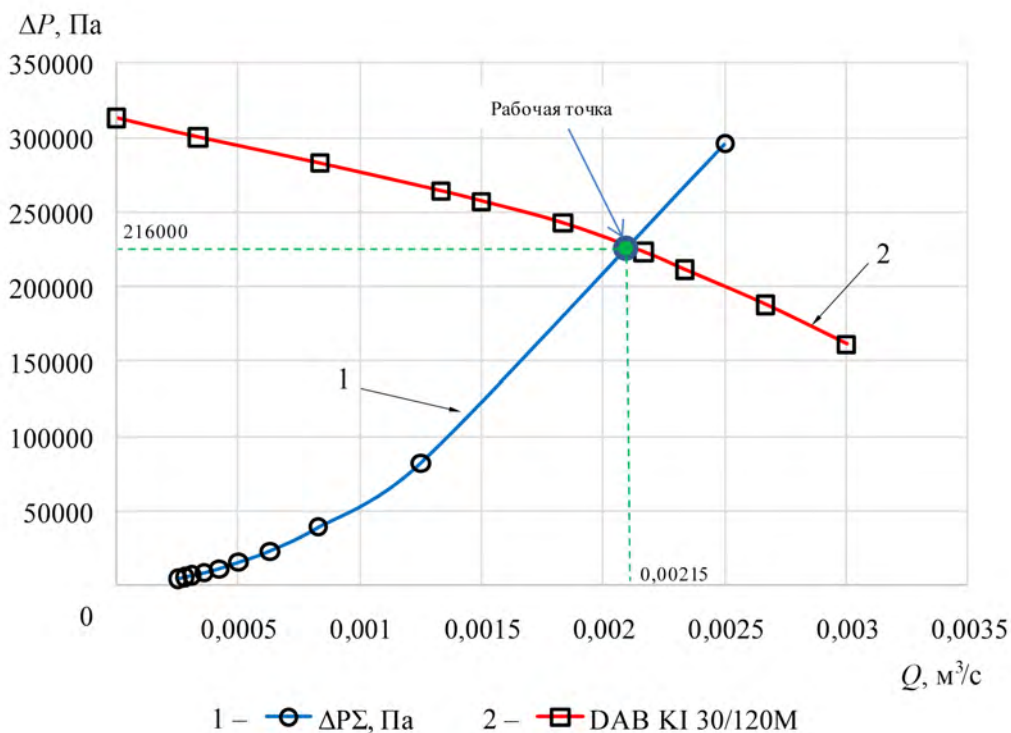


Рис. 3. Гидравлические характеристики контура и выбранного насоса

Внешний вид стенда ФТ-18 представлен на рис. 4.

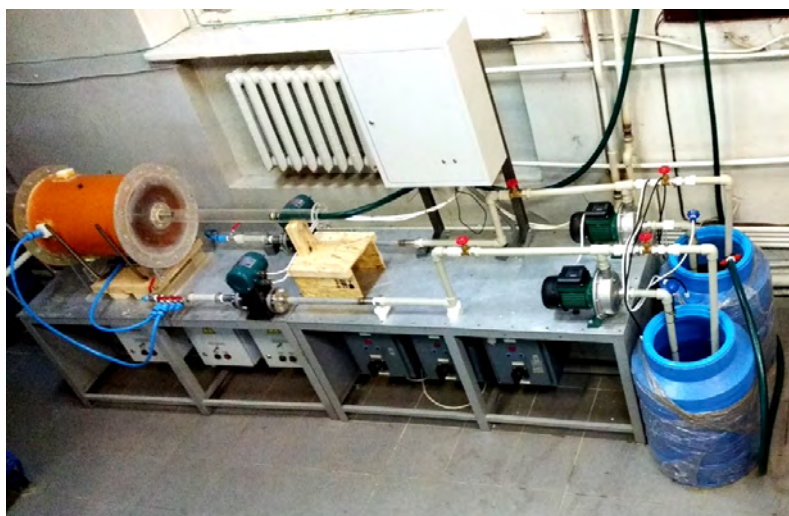


Рис. 4. Внешний вид стенда ФТ-18

## Эксперименты на стенде ФТ-18

В ходе эксперимента по исследованию процессов смешения к потоку жидкости движущемуся по внутреннему круглому каналу, подмешивался трассер, затем осуществлялась видеофиксация происходящих в зоне смешения процессов. При этом в ходе эксперимента менялось положение внутреннего канала относительно внешнего, после чего также производилась видеофиксация изменений процессов в зоне смешения.

После проведения серии экспериментов на стенде ФТ-18 по тематике исследования процессов смешения соосных потоков, возникла проблема обработки экспериментальных данных. В виду большого массива исходных экспериментальных данных, а также стремлений к повышению точности обработки этих данных, было принято решение разработки ПО для автоматизации процессов обработки. Для решения поставленной задачи была реализована методика обработка экспериментальных данных в различных программных средах (Wolfram Mathematica, Matlab, Mathcad). При этом суть методики заключалась в покоординатном определении границ потока с помощью резкого скачка интенсивности серого пикселей на этой границе и последующей статистической обработки этой границы, а также ее дальнейшая аппроксимация усредненным полиномом.

Наиболее оптимальной оказалась реализация обработки данных в программном пакете Wolfram Mathematica, которая имела следующие преимущества:

- Наиболее точное описание границ потока
- Наиболее быстрое исполнение кода программы
- Гибкий набор базовых инструментов по обработке изображений
- Относительно простой импорт /экспорт данных в различные форматы, в том числе Excel.

Алгоритм работы программы включает следующие этапы:

1. Захват скриншота непосредственно из потокового видео файла.

2. Форматирование скриншота.

3. Применение фильтров (из RGB в оттенки серого, затем в бинарный тип изображения)

(рис. 5).

4. Нахождения максимума градиента интенсивности яркости пикселей для отрисовки границ подкрашенного потока (рис. 5).



Рис. 5. Обрисовка границ подкрашенного потока

5. Вывод полученных координат в файл Excel.

6. Аппроксимация полученных координат полиномом 3 степени с выводом коэффициентов аппроксимации в Excel.

7. Наложение на изображение смешивающихся потоков найденной границы (рис. 5).

8. Пункты 2–7 повторялись циклично для каждого из 50 скриншотов обрабатываемого режима.

9. Усреднение коэффициентов полиномов 3 степени для получения общей границы потока соответствующего режима.

10. Определение пути перемешивания посредством экстраполяции аппроксимирующего полинома до стенки внешнего канала (рис. 6).

В результате обработки каждого режима течения на выходе имелось 50 файлов формата Excel с координатами границ потока, файл формата Excel с 50 коэффициентами полиномов 3 степени и файл с коэффициентами усредненного полинома в формате Excel.

Также в состав данной расчетной программы был включен модуль статистической обработки экспериментальных данных. В ходе статистической обработки коэффициентов аппроксимации была выдвинута нулевая гипотеза о нормальном распределении коэффициентов аппроксимирующего полинома. Данная гипотеза проверялась по критерию согласия Пирсона ( $\chi^2$ ) и нашла свое подтверждение. С помощью данной программы определялся путь перемешивания, посредством экстраполяции усредненного полинома до стенки внешнего канала (рис. 5 средняя линия) и определения координат пересечения полинома со стенкой внешнего канала.

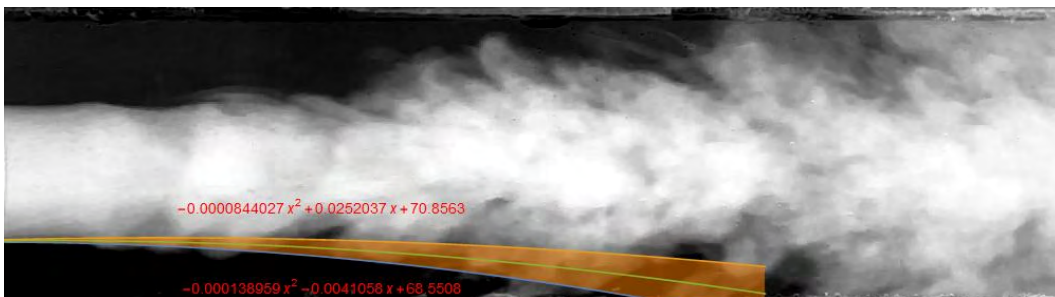


Рис. 6. Пример обработки границы потока

Экспериментальная база представляет собой 173 обработанных режимов течения исследуемой струи в спутном потоке при различном заглублении центрального канала. При этом в качестве переменной, характеризующей одновременно оба потока выбрано отношение чисел Рейнольдса этих потоков (отношение числа Рейнольдса внешнего потока к внутреннему). Интегральным результатом эксперимента является определение оптимальных режимов с точки зрения минимального перемешивания (наибольшего пути смешения) полученных из зависимости длин перемешивания от указанной выше переменной

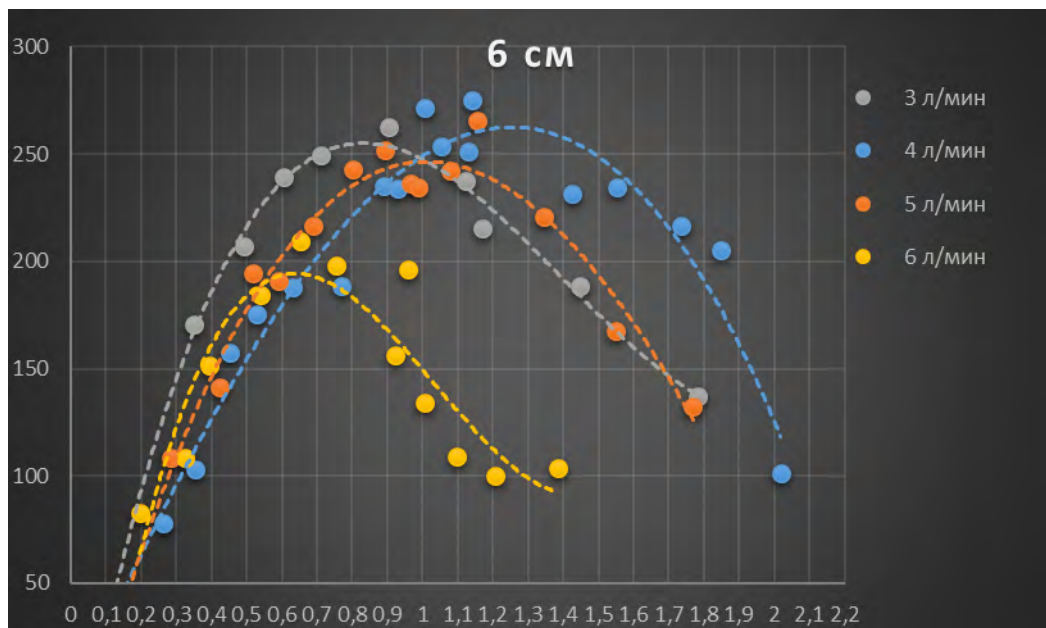


Рис. 7. Зависимость пути перемешивания от соотношения чисел Ренойльдса при заглублении внутренней трубы относительно внешней 6 см (расход по внутреннему каналу выступает в роли параметра)

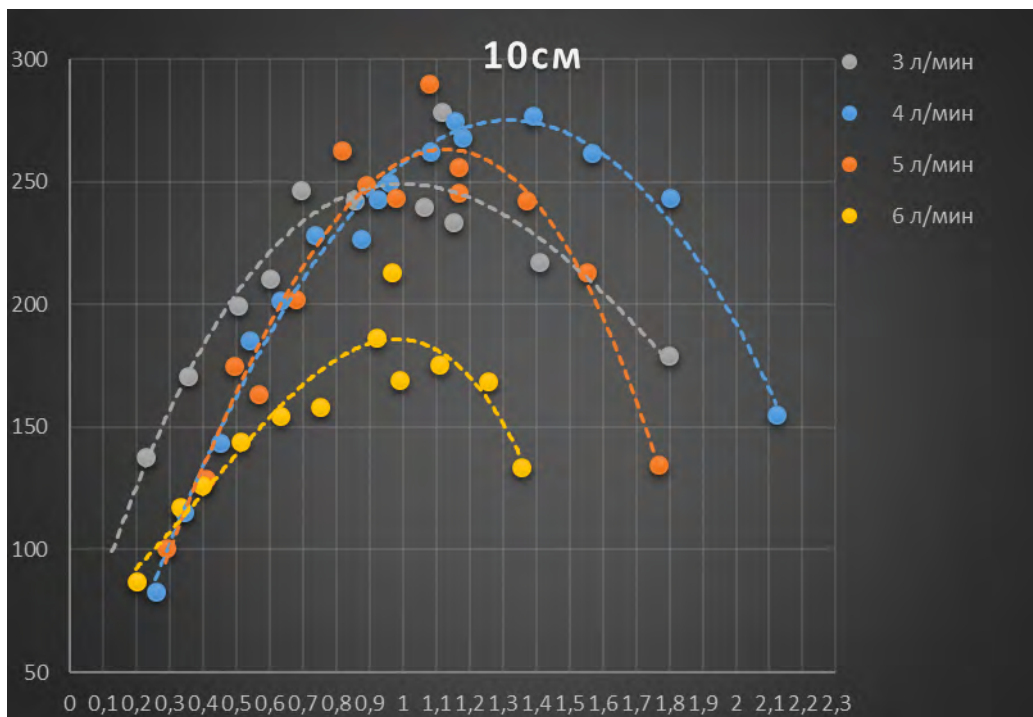


Рис. 8. Зависимость пути перемешивания от соотношения чисел Рейнольдса при заглублении внутренней трубы относительно внешней 10 см (расход по внутреннему каналу выступает в роли параметра)

Как видно из графиков, приведенных на рис. 7, 8, путь перемешивания имеет экстремум, координаты которого (оптимальный путь перемешивания  $L_{\text{опт}} и оптимальное соотношение чисел Рейнольдса  $Re_1/Re_{2\text{опт}}$  зависят от числа Рейнольдса во внутреннем канале и параметрически от заглубления круглого канала. (рис. 9, 10)$

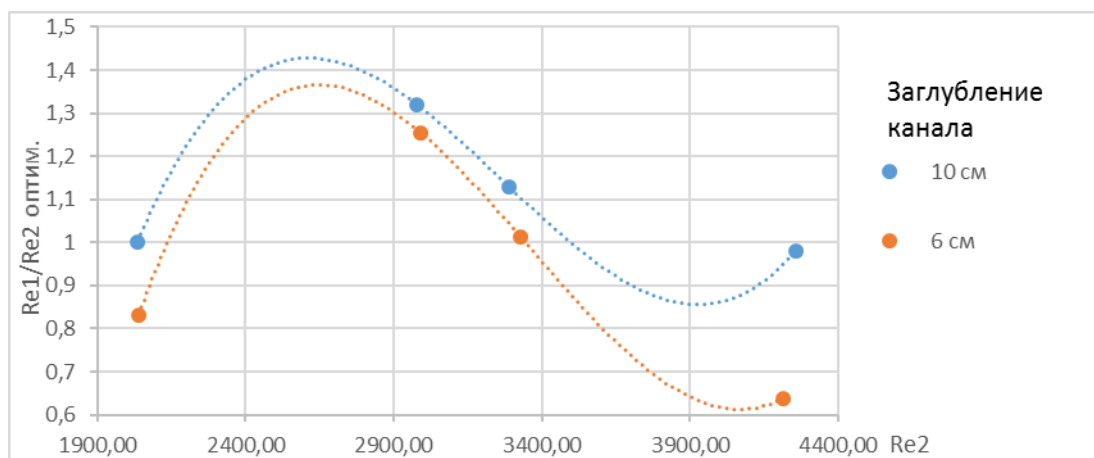


Рис. 9. Зависимость оптимального соотношения чисел Рейнольдса внешнего и внутреннего каналов от числа Рейнольдса внутреннего канала (заглубление круглого канала выступает в роли параметра)

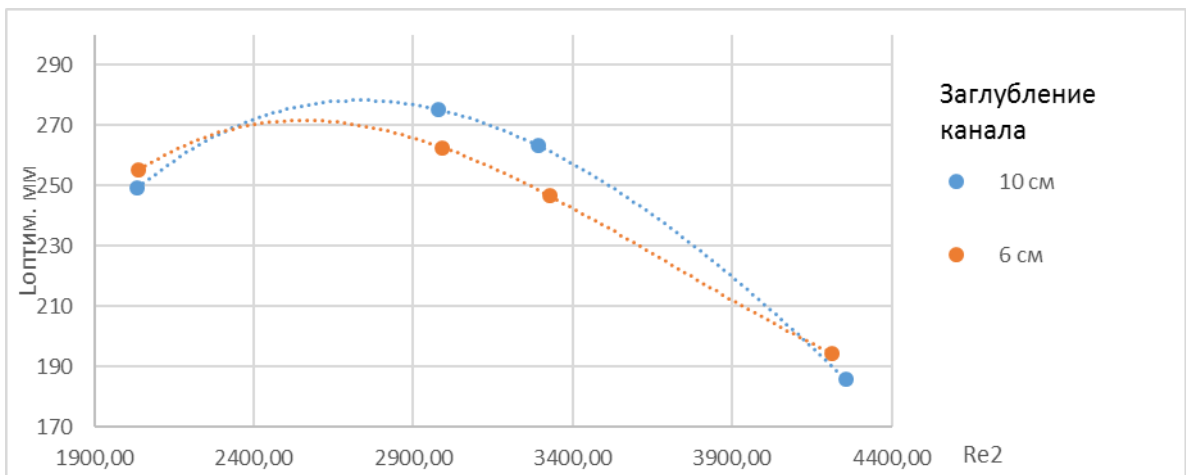


Рис. 10. Зависимость оптимального пути перемешивания от числа Рейнольдса внутреннего канала (заглубление круглого канала выступает в роли параметра)

Кроме того, была выдвинута гипотеза, что существенное влияние на процесс смешения потоков и на длину перемешивания в частности, влияет пограничный слой пристенного потока внешнего канала. С целью проверки гипотезы дополнительно были проведены предварительные исследования пограничного слоя межканального пространства. На рис. 11 видно, что интенсификация перемешивания происходит при соприкосновении внутреннего потока с пограничным слоем внешнего квадратного канала, что подтверждает исходную гипотезу.

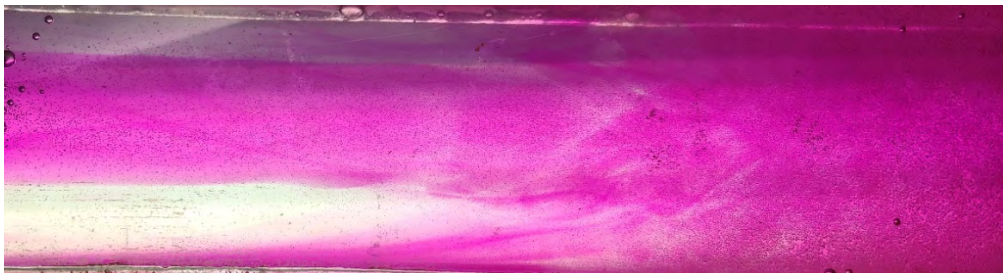


Рис. 11. Влияние пограничного слоя квадратного канала на процессы смешения

### Список литературы

1. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. – М.: Физматгиз, 1960.
2. Бай Ши-и. Теория струй. – М.: Физматгиз, 1960.
3. Forstall W., Shapiro A.H. Momentum and mass transfer in coaxial gas jets. – J. Appl. Mech., 1950. Vol. 17. N 4.
4. Forthmann, E. Uber Turbulente Strahlausbreitung. Ingenieur-Archiv, Vol. 5. P. 42, 1934; also N.A.S.A. 1936. T. M. 789.
5. Weinstein, A. S., Osterle, J. F. and Forstall, W. Momentum diffusion from a slot issuing into a moving secondary. Journal of Applied Mechanics, Vol. 23. P. 437, 195.
6. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М. О. Штейнберга. М.: Машиностроение, 1992. С. 672.