

УДК 532.5:622.32

**С.Н. Харламов, С.А. Павлов**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД НА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ УЧАСТКАХ ТРУБОПРОВОДОВ**

*Обсуждены проблемы комплексного моделирования и исследования гидродинамики и конвективного массообмена в двухфазных изотермических потоках типа «масло — вода» в трубах и каналах с горизонтальным расположением. На базе экспериментальных данных показано, что наиболее оптимальным для выбранных условий движения смеси и удобным при транспортировке является режим с присутствием воды в 10%-ом соотношении к общему объему.*

*Ключевые слова: тяжелая нефть, масло, вода, двухфазный поток, структуры потока.*

---

**В**о многих технических устройствах, встречающихся в нефтегазовой, химической, горнодобывающей промышленности, энергетическом машиностроении и теплотехнике одним из основных конструктивных элементов является труба, канал. При исследовании процессов переноса импульса, тепла и массы в этих устройствах важным является понимание и управление энергетическими механизмами изменений характеристик течений в гомогенных и гетерогенных средах на участках развития процессов, в частности, в секциях с горизонтальным и наклонным их расположением. В таких условиях при движении, например, двухфазных систем граница раздела фаз существенно зависит от динамики и эволюции фаз. Она часто нестабильна, чувствительна к возмущениям, идущим со стенок трубопроводов, вихревых камер, каналов, ограничивающих область движения, и зависит от многих параметров [1—12], в числе которых можно выделить группы, характеризующие физические свойства фаз, тепло- и гидродинамические локальные и интегральные среднерасходные величины индивидуальных компонентов смеси, химиче-

ские эффекты и т.д.. Известно, что при транспортировке реологически сложных гетерогенных сред, например в производстве скважинных работ для увеличения нефтедобычи и производства газа методом наработки тяжелой нефти с целью разлома подземных формирований (создания трещин), значительная экономия насосной мощности может быть достигнута при использовании воды, содержащейся в этой нефти в качестве смазки. Такие технологии в трубопроводном транспорте достаточно эффективны, т.к. используют положительные гидродинамические эффекты и механизмы, связанные с явлениями в двухфазных водонефтяных потоках. Анализ патентных заявок [6, 8] и публикаций, обзор многолетнего промышленного опыта эксплуатации трубопроводных линий по перекачке тяжелых нефтей и сконцентрированных эмульсий, в таких странах как: Венесуэла (54 км линия); Индонезия (238 км); США (38,6 км), Канада (нефтеносные битумные пески), исследование работ отечественных линий (мазутопроводы, линии подачи на котельных станциях и др.) показывает, что существенная экономия мощности может быть достигнута

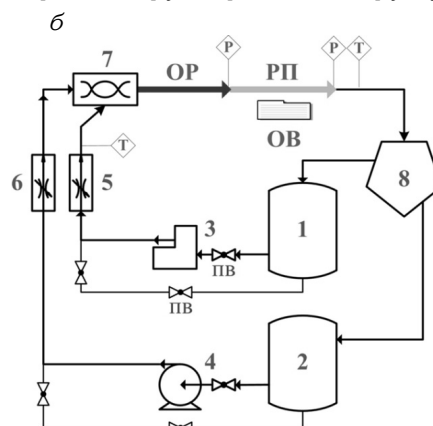
в режимах, когда вязкие фазы окружены «кольцом» воды [1, 3, 5, 9, 12].

Таким образом, исследования гидродинамики, тепло- и массопереноса в многофазных средах на отдельных участках трубопровода с горизонтальной секцией и уяснение механизмов, определяющих стабильное существование и взаимодействия фаз, а также построение интегральных критериальных связей к расчету сопротивления и массообмена в данных условиях является актуальным.

*Основная цель* настоящей работы состоит в: систематизации данных теоретического и экспериментального исследования процессов переноса импульса и массы в двухфазных потоках на участках труб с горизонтальными секциями; изучении влияния изменений физических свойств, динамической структуры входящей в трубопровод смеси «жидкость-жидкость» в условиях устойчивого движения фаз на режимы течения и массообмен.

Анализ имеющихся в литературе экспериментальных данных (напри-

мер, по исследованию гидродинамики в реологически сложных средах в горизонтальных трубах и каналах с использованием минерального масла, близкого к нефти по физико-химическим характеристикам и воды с вязкостным и плотностным соотношениями порядка  $\nu_M/\nu_B \approx 900$ ,  $\rho_M/\rho_B \approx 0,9$  соответственно на трубах, изготовленных из пирексного стекла и оргстекла с геометрией:  $x=(100 \div 300) \cdot D$ , м;  $D=(0,02 \div 0,1)$ , м [4, 7, 11], а также наши результаты по визуализации течений на экспериментальных установках, представленных в: Международной научно-образовательной лаборатории «Нефтегазовая гидродинамика и тепломассообмен» при НИ ТПУ (см. схему на рис. 1, а); НИКИ ИЛ №1 СХК (см. схему на рис. 1, б), в рамках методики экспериментального исследования ламинарных, переходных и турбулентных режимов течений двухфазных сред в трубах [2], позволяют заключить, что изменения в физических свойствах рабочей смеси, материала трубопровода, структуре



**Рис. 1.** а — схема экспериментальной установки «Поток» для исследования двухфазных сред в трубах с использованием 3D LDV System TSI Inc.; б) Схема экспериментальной установки для исследования гидродинамики вязких гомогенных и гетерогенных сред. Обозначения: 1, 2 — резервуары для масла и воды, соответственно; 3 — насос-дозатор; 4 — центробежный насос; 5, 6 — регуляторы расхода; 7 — двухфазный смеситель; 8 — сепарационная емкость; ПВ — проходной вентиль; P — область измерения давления; T — область измерения температуры; ОП — область «развития течений»; РП — область «развитого двухфазного потока»; ОВ — оборудование визуализации

фаз могут оказывать существенное влияние на локальные и интегральные параметры процесса, характер закономерностей течения и тепломассообмена.

В данной работе выполнены измерения расходов, давлений, скоростей, концентраций фаз на участке РП и осуществлен контроль за изменением локальных характеристик средствами фото- и видеотехники. Заметим, что при задании среднерасходных значений скоростей фаз (воды, масла в области входа в экспериментальную секцию трубопровода) под соответствующими скоростями понимается отношение объемной доли скорости  $i$ -ой фазы ( $\dot{V}_i$ ) к поперечному сечению трубы ( $S$ ):

$$V_M = \dot{V}_M / S, \quad V_B = \dot{V}_B / S, \quad (1)$$

А под среднерасходной скоростью смеси ( $V_{CM}$ ) принимается их суперпозиция:

$$V_{CM} = V_M + V_B. \quad (2)$$

Для определения степени экономии мощности закачки масляной фазы по отношению к течению смеси вводится относительный коэффициент падения перепада давления  $\Delta\bar{P}$ :

$$\Delta\bar{P} = \Delta p_M / \Delta p_{CM}, \quad (3)$$

где  $\Delta p_{CM}$  — перепад давления в двухжидкостном потоке «масло-вода»;  $\Delta p_M$  — перепад давления в гомогенной среде. Последний определяется по закону Хагена — Пуазейля для течения однофазного ламинарного масляного потока при том же расходе масляной фазы, как в гетерогенном потоке:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta l} (p_1 - p_2) = \frac{\pi d^4}{128\eta l} \Delta p. \quad (4)$$

Здесь  $\Delta p = p_1 - p_2$  — перепад давления на концах РП, Па;  $Q$  — секундный объемный расход жидкости, м<sup>3</sup>/с;

$R$  — радиус канала, м;  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $l$  — длина РП, м.

Методология проведения экспериментов по построению карты структур течений смеси сводилась к выполнению следующих операций.

1. Задание среднерасходной скорости  $V_M$ ;

2. Выбор интервала изменений среднерасходной скорости воды ( $V_{B, \text{мин}}$  и  $V_{B, \text{макс}}$ );

3. Ввод в секцию потока воды при условии  $V_B > V_{B, \text{макс}}$ ;

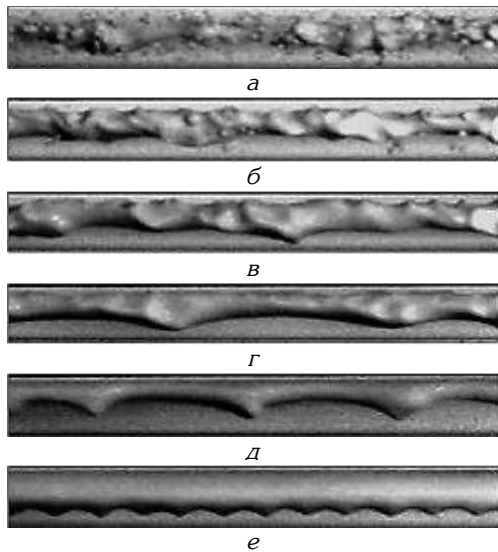
4. Введение масла со скоростью  $V_M$ ;

5. Уменьшение расхода воды до значений скорости  $V_{B, \text{макс}}$ ;

6. Проведение экспериментов при среднерасходных значениях скорости воды, изменяемых с шагом  $\Delta V_B$  (в диапазоне между  $V_{B, \text{мин}}$  и  $V_{B, \text{макс}}$ );

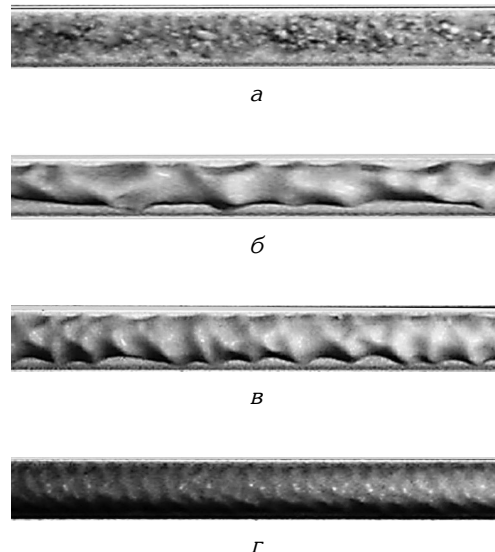
7. Составление таблицы данных экспериментов, которые идентифицируют структуру потока и границы перехода путем визуального наблюдения через стенку трубы с помощью имеющейся фото- и видеотехники.

Анализ полученных результатов и снимков картин течений высоковязких двухфазных сред позволяет сделать ряд замечаний в отношении гидродинамики и эффектов взаимодействия фаз. В частности, на рис. 2 показана эволюция прохождения двухфазного потока «масло-вода» в относительно узких трубах с диаметром  $D=0,026$  м и фиксированной среднерасходной скорости масла  $V_M=0,5$  м/с. Видно, что, начиная от дисперсно-кольцевого течения (картина структуры на рис. 2, а), при уменьшении среднерасходной скорости воды от  $V_B=1,62$  м/с, формируется переходный процесс и масло становится непрерывным в ядре (см. снимки картины на рис. 2, в-д). Из рис. 2 хорошо видна эволюция режима течения от дисперсно-кольцевого (а) до волно-



**Рис. 2.** Картины течения двухфазного потока «масло-вода» при фиксированных значениях среднерасходной скорости масла  $V_M=0,50$  м/с и среднерасходными скоростями воды  $V_B=$   $= 1,62$  (а);  $1,10$  (б);  $0,73$  (в);  $0,33$  (г);  $0,28$  (д);  $0,10$  (е), м/с соответственно (фазы движутся слева направо)

образно-расслоенного (е). Визуализация позволяет также отметить процесс исчезновения каплей различных размеров рядом с довольно искаженной картиной «масло-вода» при уменьшении расхода воды, которые отлично поглощаются масляным ядром. Опыты показывают, что при более низкой среднерасходной скорости воды кольцевой поток превращается в кольцевой волнообразный узор с большой амплитудой волн (д), локализуемых в нижней части масляного ядра на границе раздела фаз (см. рис. 2, г, д). Кроме того, обнаружено, что при уменьшении расхода воды формируется расслоенный режим течения, где к смачиванию стенки трубы добавляется масляная фаза. В волнисто-расслоенном режиме (е), по мере уменьшения расхода воды, по-

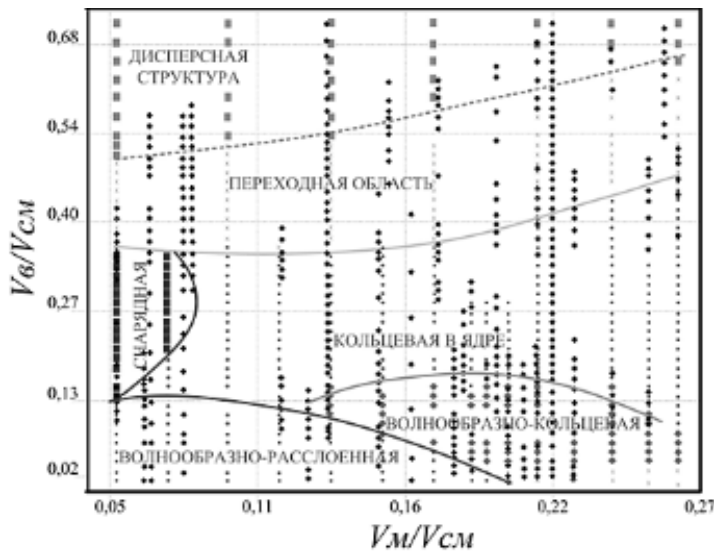


**Рис. 3.** Картины течения двухфазного потока «масло-вода» в узких трубах из оргстекла при фиксированном значении среднерасходной скорости масла  $V_M=0,83$  м/с и среднерасходными скоростями воды:  $V_B=2,50$  (а);  $0,79$  (б);  $0,42$  (в);  $0,06$  (г), м/с соответственно (движение фаз аналогично рис. 3)

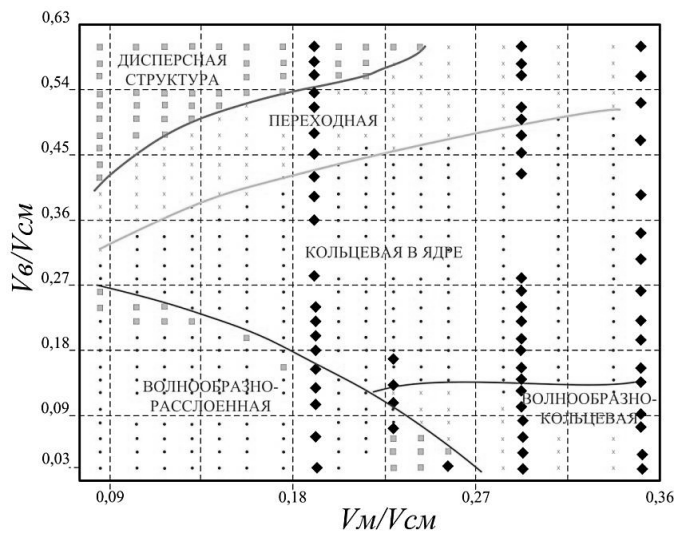
верхностные волны становятся по амплитуде меньше.

На рис. 3 представлена эволюция течения в узких трубах из оргстекла при фиксированной среднерасходной скорости масла  $V_M=0,83$  м/с. Картины течения показывают, что в диапазоне расхода воды со скоростями  $V_B=(0,06\div 2,50)$ , м/с, расслоенная картина не появляется, а наблюдается так называемая «гофрированная кольцевая конфигурация» с тонкой рябью волн между двумя жидкостями (см. рис. 3, г).

Результаты теоретического и экспериментального анализа показывают, что на характер внутреннего течения гетерогенной среды существенное значение оказывают теплофизические и механические свойства материала стенки трубы и условия



**Рис. 4. Шаблон карты существования устойчивых режимов течения двухфазных сред «жидкость-жидкость» в узких трубах из оргстекла (масло-вода,  $D=0,026\text{ м}$ ),  $\blacklozenge$  — данные измерений настоящей работы, другие символы — данные работ E. Stalio, Brauner N., Lovick J. etc**



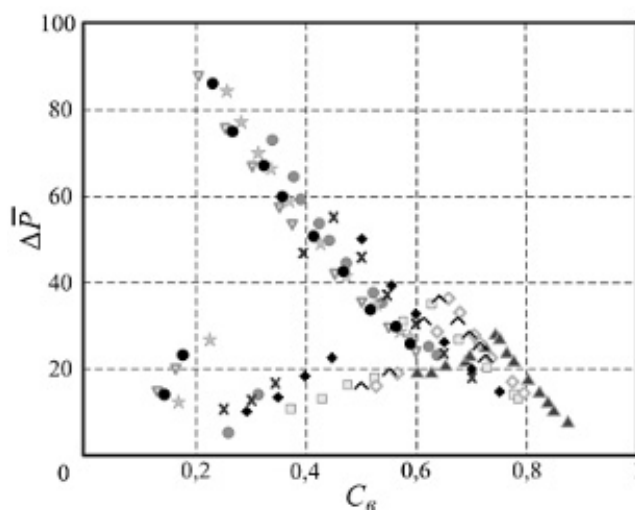
**Рис. 5. Шаблон карты режимов и структуры потока двухфазной среды для трубы из пирекса (масло-вода,  $D=0,04\text{ м}$ );  $\blacklozenge$  — данные настоящей работы, другие символы — данные работ E. Stalio, Brauner N., Lovick J. etc**

внешнего воздействия (например, обогрев тепловым потоком трубы из пирекса в сравнении со случаем изо-

термического движения в трубе из оргстекла). В частности, первоначально фиксируется сходство картин с данными на рис. 2, 3. Но уже при переходе от кольцевого режима в ядре (б, в) к расслоенному (е) появляются явные изменения в структуре масляной фазы. Так, для более высоких поверхностных скоростей масла в трубах из пирексного стекла не наблюдалось появление расслоенных картин потока.

На основе имеющихся и полученных экспериментальных данных о режимах течения в системе «масло-вода» в настоящей работе проанализированы связи между среднерасходными скоростями воды и масла в области входа в трубопровод и составлен шаблон режимов потока с указанием областей их существования для узких труб из оргстекла с диаметром  $D=0,026\text{ м}$ . Отдельные результаты этого анализа приведены на рис.4.

Видно, что между дисперсным и кольцевым режимами в ядре течения существует широкая переходная зона. Причем, в рамках выбранных вход-



**Рис. 6. Распределения коэффициента перепада давления  $\Delta\bar{P}$  в зависимости от  $C_v$  в трубопроводе с секцией  $D=0,026\text{м}$  при различных значениях среднерасходной скорости масла (значки (1, ●) — настоящие измерения, другие символы — данные измерений E. Stalio, Brauner N., Lovick J. etc., течение осуществляется при условии  $(V_m/V_{cm}) < (V_m/V_{cm})_{кр}$ , секция из плексиглаза). Обозначения ▲, ◆, 1, ●, ■, ◆, ×, ☆, ●; ▼ соответствуют значения  $(V_m/V_{cm})$  от 0,06 до 0,19**

ных условий для  $V_m$ ,  $V_v$  и учета влияния свойств стенки труб, при изменении структуры входящего потока установлено, что переходная область имеет вполне устойчивые границы (см. рис. 4).

Однако следует иметь в виду, что характер и структура течения в установленных зонах будут весьма чувствительны к различным возмущениям как вихревой, так и акустической природы в реальных условиях эксплуатации трубопровода. Это приводит к необходимости многопараметрического анализа проблемы и определения зависимости картин течений и структуры от соответствующих безразмерных комбинаций. Ясно, что в группе определяющих чисел подобия должны быть числа, отвечающие как за устойчивое существование фаз, так

и эволюцию процессов течения в гетерогенной смеси. В этом смысле данные рис.4 могут быть уточнены и их получение представляет предмет дальнейших исследований.

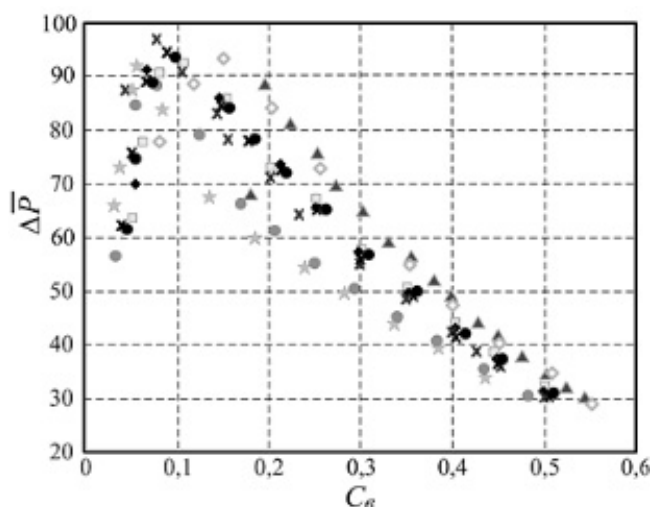
Также из рис. 2—5 следует, что выявленные границы областей существования режимов и структур течения весьма чувствительны к геометрии и возмущениям, идущим со входа и стенок. Проведенные исследования показывают, что используя кольцевой режим в ядре для транспортировки вязкой нефти, необходимо выбрать подходящие для энергосберегающей эксплуатации условия. Оптимальными здесь будут условия, за пределами которых расслоенные течения не поддерживаются и которые в общем случае

зависят от ряда геометрических параметров: шероховатости и диаметра трубы, угла соприкосновения фаз, реологических свойств жидкостей. Аналогичные замечания можно встретить, например, в [3, 5, 10].

В практике прикладных исследований гидродинамики реологически сложных сред наряду с анализом локальной структуры представляют интерес изменения интегральных величин, например, данные падения перепада давления в трубопроводе  $\Delta\bar{P}$  (3) в зависимости от изменения коэффициента среднерасходной скорости воды  $C_v$ :

$$C_v = V_v / V_{cm} \quad (5)$$

Анализ распределений этих величин может дать полезную информацию об организации оптимального



**Рис. 7. Распределения коэффициента перепада давления  $\Delta\bar{P}$  в зависимости от  $C_B$  в трубопроводе с секцией  $D=0,026\text{м}$  при различных значениях среднерасходной скорости масла (значки:  $\bullet$ ,  $\times$  — настоящие измерения, другие символы — данные измерений E. Stalio, Brauner N., Lovick J. etc., течение осуществляется при условии  $(V_M/V_{CM}) > (V_M/V_{CM})_{кр}$ , секция из плексиглаза). Обозначениям  $\blacktriangle$ ,  $\blacklozenge$ ,  $\blacksquare$ ,  $\bullet$ ,  $\times$ ,  $\blacklozenge$ ,  $\times$ ,  $\bullet$ ,  $\star$  соответствуют значения  $(V_M/V_{CM})$  в пределах от 0,19 до 0,26.**

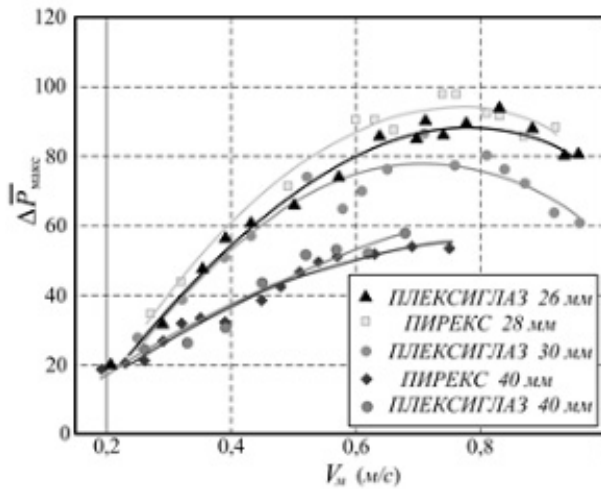
режима функционирования энергетического оборудования, обеспечивающего транспорт рабочей смеси по трубопроводу. Часто на практике возникают ситуации, когда необходимо управлять структурой потока в условиях снижения эффективности смазывающего эффекта водяной фазы при переходе от кольцевого режима (вода смачивает всю окружность трубы) к стратифицированному (труба смачивается также нефтью). В таких условиях переход основного кольцевого течения к стратифицированному характеризуется поведением перепада давления, которое заметно отличается в зависимости от пути перепада. Последний идет по сценарию смены структур от волнообразно-кольцевого к гофрированно-кольцевому режиму.

Отдельные данные измерений падения коэффициента давления  $\Delta\bar{P}$  от изменений параметра  $C_B$  (5) в зависимости от уменьшения водной фракции представлены на рис.6, 7.

Видно (см. рис.6), что если масло движется в ядре кольцевого режима при фиксированной поверхностной скорости  $(V_M/V_{CM}) < (V_M/V_{CM})_{кр}$ ;  $(V_M < V_{M,кр})$  (здесь  $V_{M,кр}$  — критическое значение среднерасходной скорости масла, указывающее на условия перехода динамических структур и полученное из шаблона карты режимов течений двухфазных сред), то постепенное уменьшение расхода воды уменьшает градиент давления в смеси. Эти процессы способствуют увеличению параметра  $\Delta\bar{P}$  и данные измерений в нижней части

рис. 6 их хорошо иллюстрируют. Однако, после того, как коэффициент падения  $\Delta\bar{P}$  достигает высшей точки (значки « $\blacksquare$ ,  $\blacklozenge$ ,  $\times$ ,  $\blacklozenge$ ,  $\blacktriangle$ » отвечают  $C_B \approx 0,6-0,7$ ), градиент давления в смеси  $\Delta p_{CM}$  испытывает резкий рост и вызывает внезапное падение параметра  $\Delta\bar{P}$ . Такое поведение  $\Delta\bar{P}$  связано с наличием переходных эффектов в структуре (формированием условий перехода от кольцевого режима к расслоенному).

На рис. 7 приведены распределения коэффициента перепада давления  $\Delta\bar{P}$  в зависимости от изменений параметра  $C_B$  в условиях, когда его снижение происходит в рамках кольцевого режима течения, но при течении масла с параметрами  $(V_M/V_{CM}) > (V_M/V_{CM})_{кр}$ ;  $(V_M > V_{M,кр})$  Видно,



**Рис. 8. Распределения максимальных значений параметра уменьшения перепада давления  $\Delta\bar{P}_{\max}$  при изменении среднерасходной скорости масла  $V_M$ . Здесь: сплошные линии — аппроксимации данных измерений квадратичной зависимостью, данные E. Stalio, Brauner N., Lovick J. etc.; значки и линия чёрного цвета — данные настоящей работы**

что с уменьшением параметра  $C_V$  (снижение среднерасходной скорости воды) наблюдается увеличение коэффициента  $\Delta\bar{P}$  до максимума ( $\Delta\bar{P} \approx 90-100$ ). Затем  $\Delta\bar{P}$  плавно уменьшается без каких-либо скачков перепада давления, сопровождающих изменениями структуры потока. Такое поведение  $\Delta\bar{P}$  соответствует режиму движения гетерогенной смеси в трубопроводе с гофрированно-кольцевой структурой.

В целом, данные на рис. 6, 7 показывают, что экстремальные значения параметра  $\Delta\bar{P}$ , характеризующего возникновение процесса смены динамической структуры потока в двухфазной среде, изменяются в достаточно широком диапазоне. Это позволяет говорить о возможном проявлении ряда эффектов в конвективном массообмене, требующих детального анализа. В настоящей работе выпол-

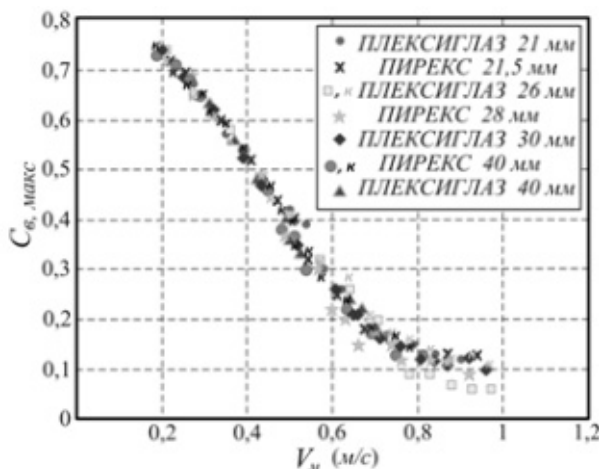
нены исследования по изучению характера связи параметра  $\Delta\bar{P}_{\max}$  от изменений среднерасходной скорости масла  $V_M$  и коэффициента  $C_{V,\max}$  от  $V_M$ . Отдельные данные этого анализа приведены на рис. 8, 9 соответственно.

В частности, данные на рис. 8 показывают, что при изменении среднерасходной скорости масла ( $V_M$ ) кривые распределений коэффициента снижения максимального перепада давления ( $\Delta\bar{P}_{\max}$ ), отвечающие анализу процессов в трубах из пирекса и плексиглаза с диаметрами  $D=0,02-0,04$ , м, будут группироваться так, что соответствующие данные  $\Delta\bar{P}_{\max}$  для труб меньшего диаметра будут выше по абсолютной величине, чем для труб с большим диаметром.

Причем наши опыты показывают (значки и линия — чёрный цвет), что в распределениях  $\Delta\bar{P}_{\max}$  локализуется зона максимальных значений в диапазоне  $V_M \approx 0,6-0,8$ , м/с, если рассматриваются режимы кольцевого течения в условиях  $(V_M/V_{CM}) > (V_M/V_{CM})_{кр}$ . Полученные результаты свидетельствуют, что наиболее эффективным режимом течения жидкостно-жидкостного потока с точки зрения экономии энергии насосной перекачки является режим, при котором не достигаются границы перехода к стратифицированным потокам.

Стоит заметить, что качественно результаты наших измерений вполне удовлетворительно согласуются с данными [9]. Это позволяет надеяться, что в данных условиях эффекты и механизмы перехода в динамической структуре реологически сложных сред





**Рис. 9.** Распределения коэффициента  $C_{в, макс}$ , учитывающего скорость подачи воды на входе в трубопровод ( $V_{в}$ ) и смену динамической структуры через коэффициент  $C_{в, макс}$  при различных значениях среднерасходной скорости масла ( $V_{м}$ ). Значки (к, к) — настоящие измерения, другие символы — данные измерений E. Stalio, Brauner N., Lovick J. etc., выполненных для труб из пирекса и плексиглаза с диаметрами:  $D=(0,021—0,04)$ , м

имеют одинаковую природу. И, кроме выполненных оценок учета влияния переменности механических, теплофизических свойств материала стенки и геометрии трубопровода, полезными в оценках эффективности течения могут быть данные связи параметра  $C_{в, макс}$  от скорости  $V_{м}$ . Так, на рис. 9 приведены результаты измерений на трубах разного диаметра максимальных значений коэффициента  $C_{в, макс}$  в режиме кольцевого течения масла. Видно, что при малых значениях  $V_{м}=0,2-0,4$ , значения параметра  $C_{в, макс}$  не зависят от диаметра трубы и материала стенки. Об этом свидетельствует группировка данных вдоль опытной кривой. Кроме того, при  $V_{м}>0,8$  коэффициент  $C_{в, макс}$  почти всегда постоянен. Следовательно, наиболее удобным режимом объемного расхода воды транспортируемого в трубе является режим с присутствием

воды в 10 %-ом отношении от общего объема смеси. Это данные хорошо согласуются с результатами исследований [12], где показано, что  $C_{в, макс} \approx 0,08 \div 0,12$  для турбулентного потока воды и ламинарного нефтяного ядра рассматриваемой жидкостно-жидкостной системы.

В заключении стоит отметить, что представленные в работе результаты экспериментального исследования конвективного массопереноса в непрерывном двухфазном жидкостно-жидкостном потоке «масло — вода» в круглых цилиндрических трубах с участками горизонтальных секций позволили определить области существования различных устойчивых течений, составить карты структур потоков в узких трубах, как геометрическое место точек. Установлено, что полученные данные хорошо коррелируют с результатами предсказания структур на базе полуэмпирических моделей, например, с данными M. Arney, P. Angeli, R. Bai, N. Brauner, D. Joseph, J. Lovick, M. Renardy и др. Наиболее оптимальным для выбранных условий движения смеси и удобным при транспортировке является режим с присутствием воды в 10 %-ом отношении от общего объема смеси. Показано, что главным в процессе стабилизирующего действия на кольцевой поток в ядре выступает процесс переноса импульса в смеси за счет конвективно-диффузионных механизмов. Причем из-за многообразия явлений во взаимодействующих фазах исследования областей существования устойчивых структур требуют привлечения теории подобия, а также уточнения и

имеют одинаковую природу. И, кроме выполненных оценок учета влияния переменности механических, теплофизических свойств материала стенки и геометрии трубопровода, полезными в оценках эффективности течения могут быть данные связи параметра  $C_{в, макс}$  от скорости  $V_{м}$ . Так, на рис. 9 приведены результаты измерений на трубах разного диаметра максимальных значений коэффициента  $C_{в, макс}$  в режиме кольцевого течения масла. Видно, что при малых значениях  $V_{м}=0,2-0,4$ , значения параметра  $C_{в, макс}$  не зависят от диаметра трубы и материала стенки. Об этом свидетельствует группировка данных вдоль опытной кривой. Кроме того, при  $V_{м}>0,8$  коэффициент  $C_{в, макс}$  почти всегда постоянен. Следовательно, наиболее удобным режимом объемного расхода воды транспортируемого в трубе является режим с присутствием

расширения имеющегося банка экспериментальных данных об изменении

локальных и интегральных параметров в реологически сложных средах.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мамаев В.А., Одишария Г.Э., Семенов Н.И., Точигин А.А.* Гидродинамика газожидкостных смесей в трубах. М.: Изд-во «Недра», 1969. –208 с.
2. *Харламов С.Н., Терещенко Р.Е.* Исследование конвективного теплообмена при сложном движении неньютоновских сред в трубах // Труды V Национальной Конференции по Теплообмену (РНКТ-5), Секц. «Вынужденная конвекция однофазной жидкости», 25-29.10.2010, Москва, 2010, Том 2, с.236-239
3. *Bai R., Chen K., Joseph D.* Lubricated pipelining stability of core-annular flow. Part 5. Experiments and comparison with theory // *Journal of Fluid Mechanics*. 1992, №240, p.97-142.
4. *Brauner N.C.* The prediction of dispersed flows boundaries in liquid-liquid and gas-liquid systems // *International Journal of Multiphase Flow*. 2001. Vol. 27, p. 886–910.
5. *Chakrabarti D.P., Das G., Das P.K.* Identification of stratified liquid-liquid flow through horizontal pipes by a non-intrusive optical probe // *Chem. Eng. Sci.* 2007. Vol. 62. p. 1861–1876.
6. *Keil O.M.* 1968. US Patent 3,378,047
7. *Lovick J., Angeli P.* Experimental studies on the dual continuous flow pattern in oil-water flows // *International Journal of Multiphase Flow*. 2004. Vol. 30, p. 139–157.
8. *Neiman et al.* 1999. US Patent 5,988,198
9. *Ooms G., Poesio P.* Stationary core-annular flow through a horizontal pipe // *Physics Review*. 2003. Ser. E 68, 066301.
10. *Papageorgio D.T., Maldarelli C., Rumschitzki D. S.* Nonlinear interfacial stability of core annular film flows // *Physics of Fluids*. Ser. A.1990. № 2, p. 340-352.
11. *Santos R.G., Mohamed R.S., Bannwart A.C., Loh W.* 2006. Contact angle measurements and wetting behavior of inner surfaces of pipelines exposed to heavy crude oil and water // *Journal of Petroleum Science Engineering*. 2006. Vol. 51, p. 9–16.
12. *Ullmann A., Brauner N.* Closure relations for the shear stress in two-fluid models for core-annular flow // *Multiphase Sci. Technol.* 2004. Vol. 16, p. 355–387. **ПЛАТ**

---

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Харламов Сергей Николаевич* — доктор физико-математических наук, профессор, действительный член РАЕН, felic@tpu.ru,  
*Павлов Сергей Александрович* — аспирант, sergio0500@tpu.ru,  
Томский политехнический университет.



---

#### СТАРЕЙШИЕ ГОРНЫЕ УЧЕБНЫЕ ЗАВЕДЕНИЯ

Первыми были организованы академии в Потоси (Боливия, 1557—1786), Конгсберге (Норвегия, 1757—1814), Банска Штьявница (Словакия, 1762—1919), Праге (Чехия, 1762—1772) и Фрайберге (Германия, 1765). До нашего времени сохранилась лишь Горная академия Фрайберга, основанная принцем Францем Ксавером Саксонским.