

BASES OF THE BUBBLE METHOD FOR TURBULENT FRICTION REDUCTION

Aleksey R. Evseev and Leonid I. Maltsev

Federal State Budget Research Institution Kutateladze Institute of Thermophysics

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Lavrentiev's ave. 1,

Novosibirsk 630090, Russia. E-mail: evseev@itp.nsc.ru; maltsev@itp.nsc.ru

Abstract

Microbubble saturation of the near-wall liquid flow is one of the most efficient and economic methods of turbulent friction reduction with a minimal environmental impact. It is shown in this work that the key parameter for friction reduction is void fraction of bubbles in a buffer zone of the boundary layer, whose value is determined by the gas flow rate, liquid velocity, downflow distance behind the gas generator, and gravitation orientation of the wall. In the initial region dependence between reduction of local wall friction and void gas fraction obeys the law close to the linear one. An increase in concentration near the wall above some critical values leads to intensive bubble coalescence; as a result the flow in the two-phase boundary layer turns to the film-bubble regime with typical amplification of gas phase buoyancy. At this, in the flow under the wall friction at relatively large distances from the gas generator can stay close to minimal, and in the flow above the wall it starts usually increasing. Understanding of physical foundations facilitates optimization of microbubble saturation as the method for reduction of turbulent friction on boats.

Key words: bubble method, reduction of turbulent friction, gas concentration

1. ВВЕДЕНИЕ

Снижение гидродинамического сопротивления на телах, движущихся в воде, и управление касательными напряжениями в турбулентном пограничном слое являются предметом обширных исследований в течение последних десятилетий. Одним из наиболее эффективных и экономичных способов снижения турбулентного трения с минимальным экологическим воздействием на окружающую среду является микропузырьковое газонасыщение пристенного потока жидкости. Обзоры предыдущих исследований представлены в работах (Merkle&Deutsch, 1992; Мальцев и др., 2000; Ceccio, 2010).

Идея уменьшения гидродинамического трения с помощью газа (воздушной прослойки) впервые была высказана Фрудом в 1875 г. Предполагалось, что при помощи вдува воздуха в пристенную часть потока возможно существенно уменьшить трение воды, при этом многократный эффект уменьшения касательных напряжений на стенке будет обеспечен за счет «газовой смазки», то есть весьма малых вязкости и плотности воздуха в тонком газовом слое, отделяющем воду от стенки. Теоретические работы (Лойцянский, 1942, Федяевский, 1943), проведенные в рамках гомогенной модели газожидкостной смеси, подтвердили, что в турбулентном пограничном слое с переменными плотностью и вязкостью эффект многократного снижения трения может быть получен.

Эксперименты (McCormick and Bhattacharya, 1973) впервые показали, что водородные пузырьки, созданные электролизом, могут снизить лобовое сопротивление буксируемой модели на 30% при числах Рейнольдса до $\sim 2.5 \times 10^6$. Первые комплексные измерения снижения локального трения,

пульсаций давления и профилей концентрации газа в пограничном слое на пластине при числах Рейнольдса до 10^7 при вдуве газа через пористую стенку приведены в работе (Мигиренко, Евсеев, 1974). Наблюдалась следующая закономерность: пропорционально росту расхода газа увеличивалась его концентрация в пристенной зоне и эффективность снижения локального трения на пластине, одновременно уменьшалась интегральная величина пульсаций давления, что указывало на модификацию пристенной турбулентности. При одинаковом расходе газа с ростом скорости потока увеличивалось снижение локального трения на пластине, но увеличение расхода газа сверх оптимальной величины (Q^*) уменьшало дальнейшую эффективность снижения трения. Было показано, что на расстоянии 50 мм за газогенератором снижение локального трения на нижней стенке может достигать 80 %, а концентрация газа ϕ в пристенной зоне ($Y/\delta \approx 0.1$) может быть $\sim 74\%$, где δ - толщина пограничного слоя, Y - координата по нормали к стенке. На основе анализа корреляции между снижением локального трения, уменьшением интенсивности пульсаций давления и локальной концентрацией газа в пристенной зоне (ϕ^*), была предложена гипотеза, в которой механизм снижения трения пузырьковым методом связан с уменьшением плотности газожидкостной смеси в пристенной зоне и уменьшением интенсивности генерации турбулентности (модификации турбулентности) при взаимодействии пузырькового облака с вихревой пеленой во внутренней (буферной) области пограничного слоя.

С целью дальнейшего исследования физического механизма снижения трения при пузырьковом методе и проверки указанной выше гипотезы, были проведены комплексные измерения снижения локального трения на стенке и его пульсаций, профилей скорости и концентрации газа в газожидкостном турбулентном потоке в трубе сечением $30 \times 40 \text{ мм}^2$ при $Re = 2.2 \times 10^5$ на расстоянии 50 мм за местом вдува газа через пористую вставку (Дубнищев, Евсеев и др., 1975). Оказалось, что при газонасыщении потока в вязком подслое нет пузырьков, профиль концентрации газа быстро достигает максимума в пристенной зоне ($2Y/H = 0.1$, $H = 30$ мм - высота трубы), а затем практически экспоненциально уменьшается до нуля на верхней границе пузырькового слоя. Снижение локального трения в двухфазном потоке было связано с уменьшением градиента скорости жидкости на стенке и интенсивности пульсаций трения в области высоких частот (пропорционально расходу газа до Q^*), что подтверждало указанный в предыдущей работе механизм воздействия пузырьков на пристенную турбулентность и гашение интенсивности генерации турбулентности.

В работе (Богдевич, Малюга, 1976) исследовался эффект снижения трения с помощью вдува газа через проницаемое покрытие во входном участке гидродинамического канала с поперечным сечением $50 \times 180 \text{ мм}^2$ и длиной 1200 мм при числах Рейнольдса до 7×10^6 . Было показано, что при вдуве газа через пористую стенку эффект снижения трения сохранялся вниз по потоку на расстоянии ~ 25 толщин пограничного слоя, а размер пор газогенератора мало влиял на этот эффект в диапазоне от 1 до 50 микрон. Форма профиля концентрации газовой фазы, измеренная датчиком проводимости, была подобна предыдущим работам.

Оптимизация относительных размеров газогенератора при применении пузырькового метода снижения трения исследована в работе (Богдевич, Мальцев, Малюга, 1998). Особенности щелевого вдува газа на телах, движущихся в воде, и возможные механизмы снижения трения при газонасыщении турбулентного пограничного слоя представлены в работах (Мальцев, 1995, Мальцев и др., 2006).

В национальной лаборатории Пенсильванского университета (США) проведено дальнейшее изучение физических основ снижения турбулентного трения при газонасыщении потока, обзор которых приведен в (Merkle, Deutsch, 1992). В работах (Madavan et al., 1984, 1985a) исследовалась эффективность снижения турбулентного трения с помощью газонасыщения на

начальном участке гидродинамического тоннеля в диапазоне чисел Re до 2×10^7 при различной гравитационной ориентации стенки. Было показано, что максимальное снижение трения на 80% достигается при минимальной скорости потока ($U=4.7$ м/с) на верхней стенке (plate on top), а при максимальной скорости потока ($U=16.8$ м/с) гравитационная ориентация стенки не влияла на эффективность снижения турбулентного трения. При удалении вниз по потоку за газогенератором эффект снижения трения уменьшался от максимума почти до нуля на расстоянии порядка 35 толщин пограничного слоя. При газонасыщении турбулентного потока интенсивность пульсаций трения на стенке также уменьшалась в области высоких частот, что подтверждало результаты предыдущих исследований. Для объяснения эффекта была предложена гипотеза, в которой механизм снижения трения при газонасыщении пограничного слоя аналогичен действию полимерных добавок (Lumley, 1977), и связан с увеличением эффективной вязкости газожидкостной смеси в буферной зоне, под действием которой уменьшается интенсивность генерации турбулентности и увеличивается толщина вязкого подслоя. Результаты моделирования, проведенного с применением стандартного численного кода для сжимаемого турбулентного пограничного слоя показали, что снижение трения на 50% и более возможно, причем пузырьки наиболее эффективны, когда пик концентрации находится в буферном слое. Влияние пузырей моделировалось с учетом изменения эффективной вязкости и плотности смеси, как функции заданного профиля концентрации газовой фазы (Madavan et al., 1985b).

Путем учета ослабления лазерного излучения, прошедшего через водопузырьковую смесь, исследовалось относительное распределение газовой фазы в пограничном слое на пластине (Re до 2×10^7) при различной гравитационной ориентации стенки (Pal et al., 1988). Показано, что при вдуве газа через пористую вставку в вязком подслое практически нет пузырьков, эффект снижения трения наблюдался только в случае присутствия пузырьков в пристенной зоне при $Y^+ = Y u^+ / \nu < 200$, где $u^+ = (\tau_w / \rho)^{0.5}$ динамическая скорость, τ_w – касательные напряжения на стенке, ρ – плотность жидкости, ν – кинематическая вязкость жидкости. Фотографирование потока при малых расходах газа показало, что вниз по потоку за газогенератором слияние пузырьков приводило к увеличению их размеров, увеличение расхода газа также увеличивало размеры пузырьков, а рост скорости потока их уменьшал при прочих равных условиях. Толщина пузырькового слоя при нижней ориентации стенки оказывается выше, чем при верхней, из-за эффекта плавучести.

С применением бесконтактного оптического метода (Fontaine et al., 2005) проведены измерения концентрации газа в пристенной зоне, а также скорости газовой фазы во внешней области пограничного слоя со снижением трения до 60% при Re до 2×10^7 во входном участке гидродинамического тоннеля. Показано, что при $Y^+ \approx 30$ концентрация газа составляет не более 3-5%, а в вязком подслое пузырьков нет. При удалении от стенки концентрация пузырьков резко увеличивается до максимума в пристенной зоне. Скорость пузырьков относительно жидкости постепенно уменьшалась (до $\sim 30\%$) при приближении к стенке от верхней границы слоя. Применение методики было ограничено объемной концентрацией газа $\sim (40-50)\%$.

Исследования эффективности газонасыщения при больших числах Рейнольдса до 2×10^8 проводились в большом кавитационном канале военно-морского флота США сечением 3.05×3.05 м² и длиной 13 м при скоростях потока до 20 м/с. В работе (Sanders et al., 2006) при вдуве газа через пористую стенку на пластине длиной 12.9 м (plate on top) с нулевым градиентом давления реализован режим течения с почти непрерывной газовой пленкой, которому соответствовало снижение локального трения, близкое к 100%, практически на всей длине пластины. Видеосъемка пристенной зоны показала, что такой результат получен при скорости потока 6 м/с за счет коалесценции газовых пузырьков, которые под действием

плавучести двигались к стенке, сливались и создавали почти непрерывную газовую пленку (режим ALDR). При увеличении скорости потока до (12 – 18) м/с при вдуве газа в пограничном слое пластины реализовывался пузырьковый режим течения газожидкостной смеси (режим BDR), а эффект снижения локального трения вниз по потоку за газогенератором уменьшался от максимума (80%) до (5-10)% на расстоянии ~3-4 м за газогенератором. Снижение локального трения наблюдалось, когда пузырьки размером $d^+ = D_b u^+ / \nu \leq 100$ находились в пристенной зоне в пределах $Y^+ < 300$.

В работе (Elbing et al., 2008) на той же пластине длиной 12,9 м (plate on top) реализован режим течения с почти непрерывной газовой пленкой, которому соответствовало снижение локального трения $90 \pm 10\%$ по всей длине при скоростях потока до 15 м/с. Датчиками проводимости заделанными заподлицо со стенкой пластины была измерена локальная концентрация газовой фазы в пристенной зоне толщиной до 5 мм. Измерения показали корреляцию между снижением локального трения и концентрацией газа вблизи стенки для пузырькового режима течения газожидкостной смеси. При снижении трения в турбулентном пограничном слое с помощью газонасыщения предложено рассматривать три режима в зависимости от удельного расхода газа (q): пузырьковый режим (BDR), в котором эффект снижения трения до ~20% растет линейно с увеличением q ; переходный пленочно-пузырьковый режим, в котором эффект снижения трения ~(20-80)% растет с увеличением q на много круче (q_{trans}); пленочный режим (ALDR), который характеризуется тонким воздушным слоем (пленкой) между поверхностью и потоком жидкости со снижением трения $90\% \pm 10\%$ (q_{crit}), где $q = Q/b$ - удельный расход газа, Q - расход газа, b - ширина газогенератора. Приведена зависимость q_{trans} и q_{crit} от скорости потока и шероховатости поверхности.

В работах японских исследователей представлены результаты успешного применения пузырькового метода снижения турбулентного трения на пластинах длиной до 50 метров и натурных кораблях. При испытаниях макетов танкеров с длиной пластин 20, 40 м и шириной 0.6 м получено снижение трения ~ 30 и 15% (Watanabe et al., 1998), а на пластине длиной 50 м и шириной 1 м при скорости буксировки в специальном бассейне 7 м/с получено ~ 10-15% (Tahakashi et al., 2003, Kodama, Tahakashi et al., 2004). В полномасштабном эксперименте, используя учебное судно SEIUN-MARU, получено снижение потерь на трение 3 %, а чистая экономия энергии составила 2% при скорости движения судна 7 м/с. (Nagamatsu et al. 2002). В другом полномасштабном эксперименте, используя цементовоз, пузырьки воздуха не попадали в основание корпуса, и поэтому снижение потерь составило 1 % (Kodama et al., 2005).

С применением оптических методов PIV (Kitagava et al., 2005), PTV (Murai et al., 2006, 2007) проведены исследования механизма снижения трения при пузырьковом методе в горизонтальном канале сечением $10 \times 100 \text{ мм}^2$. Было показано, что с применением достаточно крупных пузырьков 0.5-2.0 мм при низких числах Рейнольдса можно получить существенное снижение турбулентного трения. Пузырьки газа модифицируют турбулентность, уменьшая положительную составляющую турбулентного трения $\rho(1 - \phi)u'v'$ за счет уменьшения плотности газожидкостной смеси у стенки, и добавляя отрицательную составляющую $-\phi'v'$, связанную с колебательным движением пузырьков у верхней (top) стенки канала, здесь ρ плотность жидкости, ϕ объемная концентрация газовой фазы, u' и v' продольные и поперечные пульсации скорости жидкости.

Зависимость снижения локального трения от концентрации пузырьков в пристенной зоне горизонтального канала сечением $10 \times 100 \text{ мм}^2$ исследована в (Guin et al., 1996). Показано, что снижение трения при газонасыщении потока в канале лучше коррелирует с концентрацией газа в пристенной зоне ($Y=1 \text{ мм}$), чем со средней концентрацией газа в поперечном сечении канала.

В работах (Kodama et al., 2000, Moriguchi, Kato, 2002) было показано, что в горизонтальном канале при газонасыщении потока получено снижение трения до 40% не зависимо от среднего размера пузырьков в диапазоне от 0.5 до ~ 2 мм, и показана высокая корреляция снижения трения на стенке с концентрацией газа в ее пристенной зоне.

Простая модель снижения трения при газонасыщении турбулентного потока, учитывающая уменьшение плотности смеси, увеличение ее эффективной вязкости (Sibree, 1934) и модификацию турбулентности в пограничном слое, представлена в работе (Legner, 1984). В рамках гомогенной модели он получил аналитическое выражение для уменьшения напряжения сдвига в пограничном слое с пузырьками газа, оценочные расчеты по которому хорошо соответствовали экспериментальным данным (Мигиренко, Евсеев, 1974).

В работе (Marie, 1987) предложена аналитическая модель снижения трения при газонасыщении турбулентного пограничного слоя, близкая по идеологии работе (Lumly, 1977). Предполагалось, что по аналогии с действием полимерных добавок и мелких частиц, микропузырьки увеличивают эффективную вязкость, взаимодействуют с вихревой пеленой, уменьшая генерацию турбулентности в буферной зоне, при этом увеличивается толщина вязкого подслоя и снижается трение на стенке.

Для пузырькового режима течения (BDR) в обзоре (Сессіо, 2010) обсуждаются несколько процессов, которые могут привести к уменьшению трения при газонасыщении: во-первых, присутствие пузырьков изменяет плотность и эффективную вязкость жидкости; во вторых, пузырьки при взаимодействии с потоком жидкости могут изменить турбулентный транспорт и интенсивность турбулентного обмена вблизи стенки; в-третьих, пузырьки приводят к сжимаемости потока (Lu et al., 2005); в-четвертых, динамика и взаимодействие пузырей типа слияния (коалесценции) и разрушения (раскалывания) может привести к затратам энергии турбулентности на эти процессы (Meng&Uhlman, 1998), особенно при больших числах Рейнольдса.

В (Xu et al., 2002) численно исследовано раздельное влияние уменьшения плотности газожидкостной смеси и увеличения ее эффективной вязкости на снижение трения при газонасыщении, а в работе (Skudarnov, Lin, 2006) показано влияние только плотности газожидкостной смеси на эффект снижения трения, который может достигать 50%.

В работе (Ferrante and Elghobashi, 2004, Mohanarangama et al., 2009) численно показан эффект уменьшения генерации турбулентности во внутренней области турбулентного пограничного слоя, связанный с локальными градиентами концентрации малых пузырьков около квазинаправленной по потоку вихревой пелены и ее оттеснения в зону с меньшим градиентом скорости жидкости, что приводит к утолщению вязкого подслоя и снижению трения. Кроме того в работе (Mohanarangama et al., 2009) учитывались процессы слияния-разрушения газовых пузырьков и их влияние на эффект снижения трения в турбулентном пограничном слое.

Более сильное взаимодействие между вихревой пеленой у стенки и малыми газовыми пузырьками, размеры которых имеют порядок колмогоровского масштаба турбулентности, показано в работе (Villafuerte, Hassan, 2006,), в которой для водородных пузырьков диаметром 30 микрон эффект снижения трения 44.9% получен при концентрации газа 5.1 %.

Целью экспериментальных исследований, результаты которых излагаются ниже, выполненных в достаточно широких диапазонах изменения скорости потока, расхода газа и при различной гравитационной ориентации обтекаемой стенки, является изучение влияния распределения концентрации газа в пристенных газо-жидкостных потоках на величину снижения локального трения, что позволит лучше понять механизм снижения трения за счет микропузырьков газа и оценить возможности метода.

2. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ СТЕНД И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

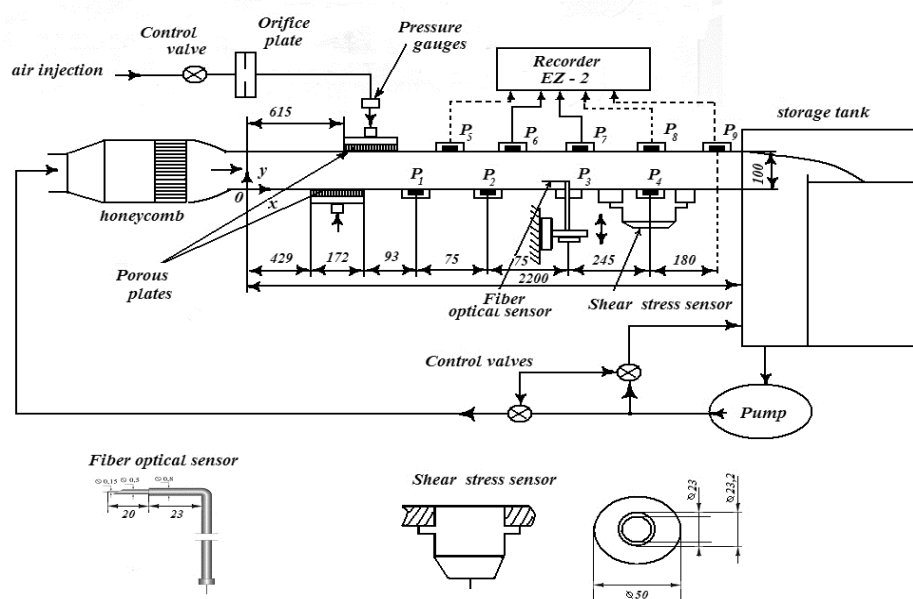
Экспериментальное исследование влияния гравитационной ориентации обтекаемой поверхности на эффективность снижения локального трения с помощью газонасыщения проводилось во входном участке гидродинамического тоннеля с прямоугольным сечением рабочей части высотой 100 мм и шириной 300 мм, длина которого составляла 2200 мм. Стенки рабочей части были изготовлены из оргстекла, что давало возможность визуальных наблюдений пузырькового слоя.

Блок-схема стенда показана на рис. 1. Вода из приемного бака перекачивалась насосом центробежного типа в рабочую часть через хонейкомб с размером ячейки 50×50 мм² и конфузор с поджатием 1:10. Степень турбулентности потока в рабочей части составляла ~ 1-2 % в диапазоне скоростей от 2 до 11 м/с. Скорость потока регулировалась задвижкой и измерялась трубкой Пито, установленной в центре входного сечения рабочей части. В открытом приемном баке пузырьки газа удалялись из жидкости. Воздух из магистрали высокого давления вводился в поток через пористую вставку (газогенератор) размером 140 (ширина) $\times$ 172 (длина) мм², который устанавливался заподлицо со стенкой на расстоянии 429 мм от конфузора в открытом варианте рабочей части, и 615 мм - в закрытом варианте гидродинамического тоннеля. Расход газа изменялся в опытах до 7 л/с и измерялся стандартной диафрагмой с погрешностью $\pm 3\%$.

При вдуве газа через газогенератор с размером пор 20 микрон в потоке создавались пузырьки со средним размером $\sim 0,2 \div 1,5$ мм в зависимости от скорости потока и расхода газа. Исследования проведены при трех скоростях потока $U=3.6$, (6.3-6.5) и 10.2 м/с в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_x = U \times X / \nu$ до $1,5 \cdot 10^7$, здесь X – расстояние вниз по потоку от начала рабочей части, U – скорость жидкости во входном сечении канала, ν – кинематическая вязкость жидкости.

Локальное трение на стенке рабочей части было измерено датчиками типа "плавающая стенка" на тензовесах. Диаметр "плавающего" диска составлял 23 мм, а зазор – 0,15 мм. Калибровки датчиков проводились до и после опытов, результаты измерений записывались на самописце EZ-2. Конструкция блока, методика калибровки и измерения датчиками типа "плавающая стенка" приведены в (Богдевич, Малюга, 1976). Характерная погрешность измерения локального трения составляла $\pm 10\%$. Датчики (P1-P4) последовательно устанавливались заподлицо на нижней стенке гидродинамического канала на расстояниях $X^*=93, 168, 243$ и 488 мм вниз по потоку за газогенератором, а на верхней стенке канала к указанным расстояниям добавились измерения при $X^*=688$ мм (P5-P9).

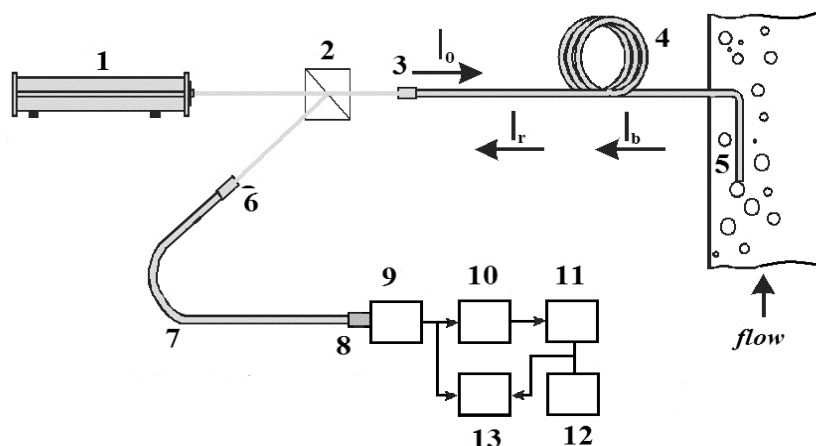
Для измерения локальной концентрации газовой фазы в широком диапазоне параметров была применена известная схема (Лисицин и др., 1980), в которой волоконный датчик выполнял роль формирующей и приемной оптики лазерного доплеровского анемометра (ЛДА) с опорным пучком, работающего в режиме обратного рассеяния. На рис. 2 а приведена блок-схема системы с электронным блоком измерения объемной концентрации газовой фазы в потоке. Луч He-Ne лазера 1 с длиной волны $\lambda=0,633$ мкм и мощностью 15 мВт направлялся на призму Волластона 2, которая выполняла роль направленного ответвителя. Далее с помощью микролинзы 3, лазерный луч вводился в волоконный световод 4 многомодового типа с размерами поперечного сечения 0,1/0,15/0,220 мм и длиной около 6 метров. Здесь указаны диаметры световедущей жилы, отражающей оболочки и вторичного защитного покрытия из эпоксиакриалата соответственно. Световод выполнял роль приемо-передающей антенны, а его зондирующий торец вводился в исследуемую область газожидкостного потока.



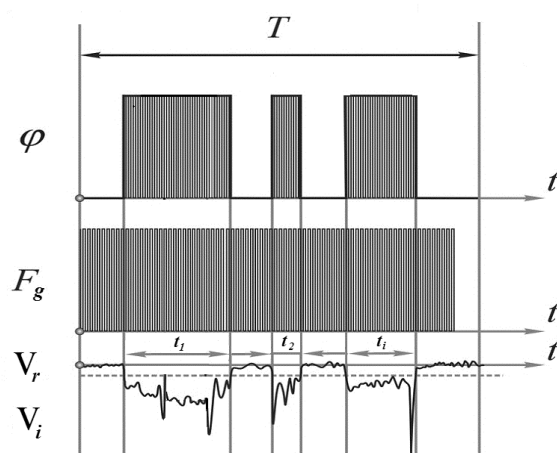
Фиг. 1. Принципиальная схема рабочего канала гидродинамического стенда.

При смене жидкой и газовой фазы, в которую погружался торец световода в газожидкостном потоке, на выходе фотоприемного устройства возникал импульс фототока (V_i), связанный с изменением коэффициента отражения от его торца. Кроме того, лазерный пучок, отраженный от передней и задней поверхностей раздела газовой фазы, частично попадал в световод, и увеличивал пиковую амплитуду переднего и заднего фронтов импульса фототока, которые были максимальны при накаливании по нормали к поверхности пузырька, и зависели от угла встречи с ней (Евсеев, 1982). Указанные лазерные пучки направляются по световоду обратно на призму Волластона, которая разделяет зондирующий и отраженные пучки по поляризационному признаку. С помощью микролинзы 6 оба отраженных пучка вводились в приемный многомодовый световод 7, по которому направлялись и вводились микролинзой 8 в фотоприемное устройство 9. С выхода фотоприемника электронные сигналы поступали на блок фильтрации 10 и компаратор 11 для измерения объемной концентрации газовой фазы в потоке, здесь 5-наконечник волоконно-оптического датчика, 12- частотомер, 13- многоканальный осциллограф для наблюдения сигналов. Локальную объемную концентрацию пузырьков можно измерять, как долю времени пребывания волоконного датчика в газовой среде ($\sum t_i$) относительно полного времени измерений T (рис. 2 б), согласно алгоритму $\varphi = (\sum t_i) / T$.

Когда зондирующий торец световода вводился в исследуемую область газожидкостного потока, компаратор измерял длительности t_i импульсов фототока от накаливания пузырьков на



(a)



(б)

Фиг. 2 а, б. Блок-схема измерения объемной концентрации газовой фазы (φ) в жидкости с помощью волоконно-оптического датчика (а), и типичная временная диаграмма обработки сигналов датчика с помощью компаратора (б).

световод по заданному порогу V_r , который в два раза и более превышал уровень шумов фотоприемника. Необходимый уровень порога определялся при калибровке волоконного датчика, и сравнении его показаний с эталонным датчиком проводимости в газожидкостном потоке в вертикальной трубе (Евсеев, Тимкин, 1983, Евсеев и др., 1987).

Передний фронт импульса фототока запускал счетчик времени, а задний фронт импульса его останавливал. Эталонная частота счетчика времени (F_g) составляла 5 МГц. Таким образом, например при $T=1$ с, цифровой частотомер показывал величину φ локальной объемной

концентрации газа. Время осреднения в каждой точке составляло 30-50 с, а относительная погрешность измерений φ составляла $\pm 10\%$.

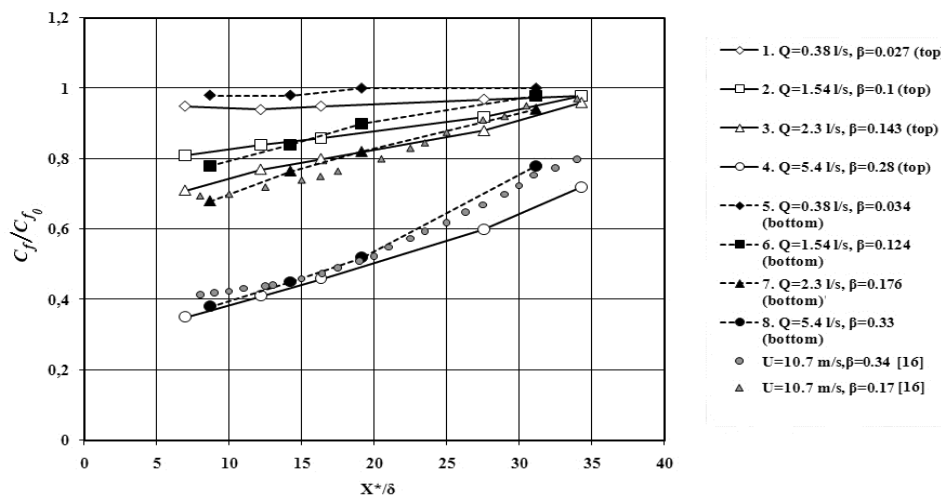
Устройство волоконно-оптического датчика показано на рис. 1. Выходной конец световода вводился в тонкую иглу от шприца диаметром 0,5 мм со скошенным под углом 45 градусов передним торцом. Она вставлялась в трубку диаметром 0,8 мм, изогнутую под углом 90° и закрепленную в координатном устройстве. Зондирующий торец световода был выдвинут из иглы в поток на 3-4 мм. С помощью координатного устройства волоконный датчик перемещался по нормали к стенке канала, и направлялся в исследуемую область газожидкостного потока. Отсчет вертикальной координаты (Y) проводился по индикатору часового типа с ценой деления 0,01 мм. На рис. 3 в показаны типичные аналоговые сигналы на выходе фотоприемного устройства (V_i) при работе волоконного датчика в газожидкостном потоке, и соответствующие им цифровые сигналы стандартного уровня, полученные при заданном пороге. Они могут быть подсчитаны, чтобы определить долю времени, когда волоконный датчик находился в газовой фазе при заданном времени измерения.

Измерения в опытах проводились следующим образом. На первом этапе проводились измерения локального трения вниз по потоку за газогенератором на нижней стенке канала. Два блока с датчиками локального трения устанавливались последовательно на расстояниях 93, 168, 243 и 488 мм за газогенератором. Измерения проводились при трех скоростях потока и четырех расходах газа. Только при измерениях на минимальном расстоянии за газогенератором расход газа изменялся в широких пределах. Затем вместо блока локального трения устанавливался блок с волоконным датчиком, и проводились измерения профиля концентрации газовой фазы в заданном сечении пограничного слоя. За счет конструктивных особенностей профили φ были измерены на расстояниях 50, 200 и 445 мм за газогенератором при указанных выше скоростях потока и расходах газа. Аналогичным образом были проведены измерения в гидродинамическом тоннеле на верхней стенке рабочей части.

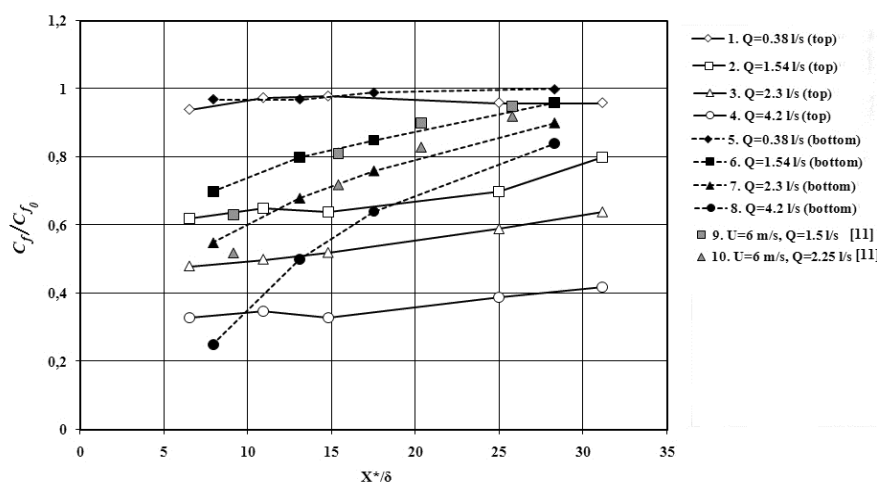
3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Распределение локального трения на верхней и нижней стенках канала при газонасыщении турбулентного пограничного слоя.

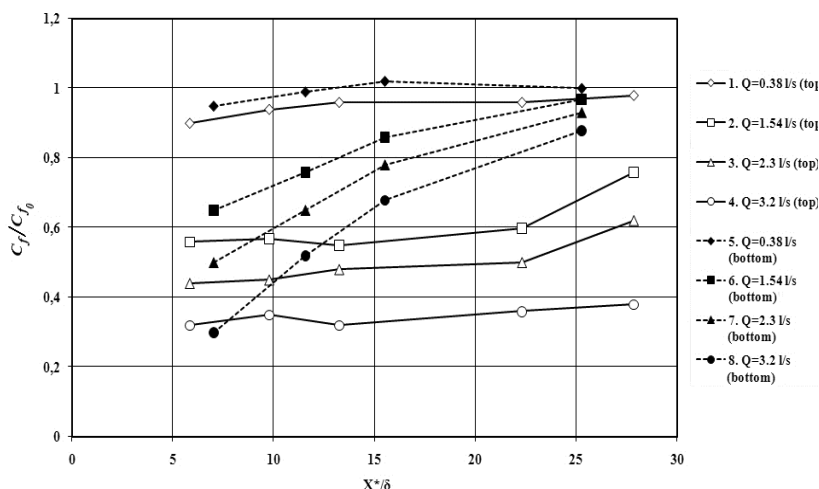
Распределения локального трения вниз по потоку за газогенератором представлены на рис. 3 а, б, с для **верхней** (top, сплошные линии) и **нижней** (bottom, пунктирные линии) стенок канала. Измерения проведены для трех скоростей потока и четырех расходов газа в диапазоне от минимального (практически без снижения трения) до оптимального Q^* . В виде исключения при скорости $U=10.2$ м/с расход газа составлял 5.4 л/с, что меньше оптимального. По оси абсцисс отложено безразмерное расстояние вниз по потоку за газогенератором X^*/δ , где δ – толщина пограничного слоя в однофазном потоке в месте установки датчика трения, а по оси ординат C_f/C_{f0} – отношение коэффициентов локального трения на стенке канала с газом и без газа, здесь $C_f = \tau_w/(0.5\rho U^2)$ и $C_{f0} = \tau_{w0}/(0.5\rho U^2)$.



(a)



(6)



(с)

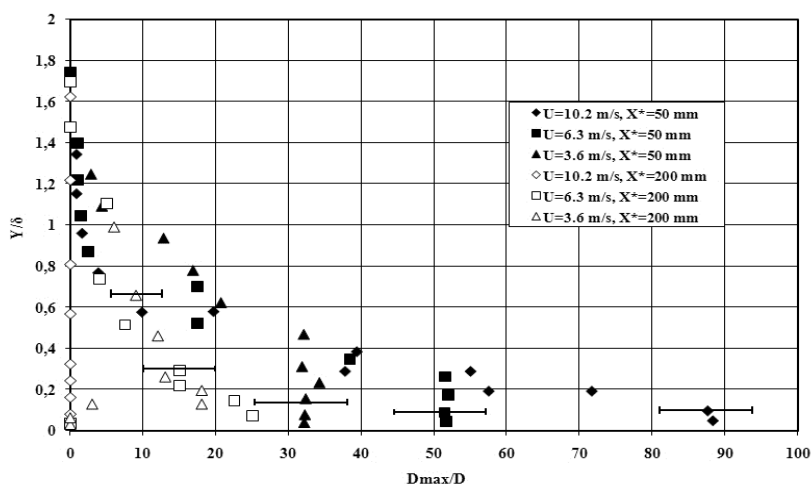
Фиг. 3 а, б, с. Распределение относительного снижения трения за газогенератором на верхней (top, сплошные линии) и нижней (bottom, пунктирные линии) стенках канала при $U=10.2$ м/с (а); 6.3 м/с (б) и 3.6 м/с (с) в зависимости от X^* и расхода газа.

При скорости потока $U=10.2$ м/с (рис. 3 а) эффект снижения трения быстро уменьшался почти до нуля на расстоянии $X^*/\delta \approx 34$. Исключение составлял режим с достаточно большим расходом газа 5.4 л/с. Влияние гравитационной ориентации стенки незначительно. Для сравнения на графике показаны данные, полученные в гидродинамическом тоннеле Пенсильванского университета (США) при скорости потока $U=10.7$ м/с (Madavan et al., 1985a). Сравнение результатов при близких расходных коэффициентах β подтверждает указанные выше закономерности, а небольшие отклонения находятся в пределах ошибки измерений. Здесь β определялась как отношение расхода газа Q к полному расходу смеси: $\beta=Q/(Q+Q_w)$, где расход жидкости $Q_w=Ub(\delta-\delta^*)$, b – ширина газогенератора, δ^* – толщина вытеснения, определяемая, как и δ для X координаты, соответствующей середине пористой поверхности газогенератора.

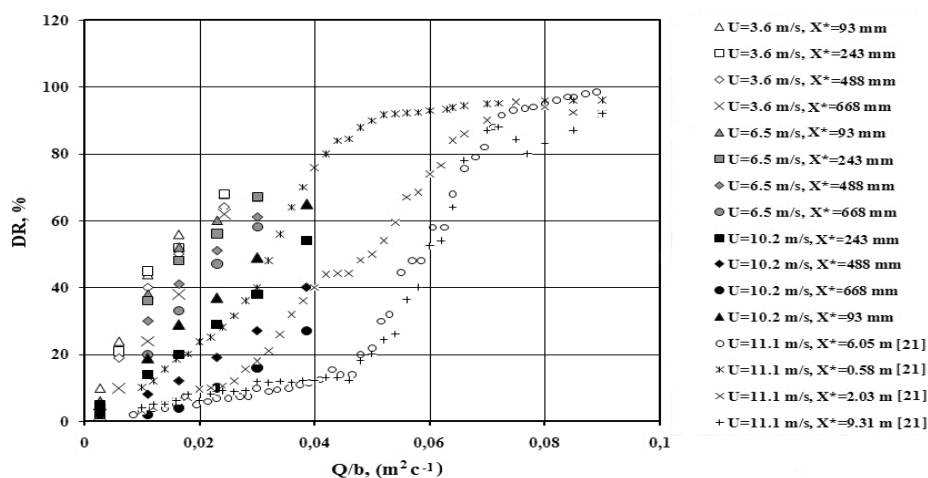
Результаты измерений снижения локального трения при скоростях потока жидкости $U=6.5/6.3$ и 3.6 м/с показаны на рис. 3 б, с. Для **нижней** стенки канала закономерности снижения трения вниз по потоку качественно подобны рассмотренным выше. Количественные различия связаны с тем, что уменьшение скорости потока при $Q = \text{const}$ приводит к увеличению локальной объемной концентрации газа в пограничном слое и большему эффекту снижения трения. Вниз по потоку этот эффект терялся на расстоянии $X^*/\delta \approx 28-31$, в основном, из-за влияния плавучести газовой фазы. Влияние гравитационной ориентации стенки на эффективность снижения трения при уменьшении скорости потока также увеличивается. На графике (рис. 3 б) для сравнения показаны результаты ранних исследований (Богдевич, Малюга, 1976), которые подтверждают указанные закономерности по снижению трения с помощью пузырькового метода для нижней стенки канала. Для **верхней** стенки канала существенное снижение трения получено практически по всей длине рабочей части (в отличие от нижней стенки), причем величина эффекта тем выше, чем больше расход газа и меньше скорость потока жидкости. Под действием эффекта плавучести газовая фаза вниз по потоку движется к верхней стенке, увеличивая концентрацию в пограничном слое, что и приводит к высокому уровню снижения трения.

3.2 Переход к пленочно-пузырьковому режиму газонасыщения пограничного слоя.

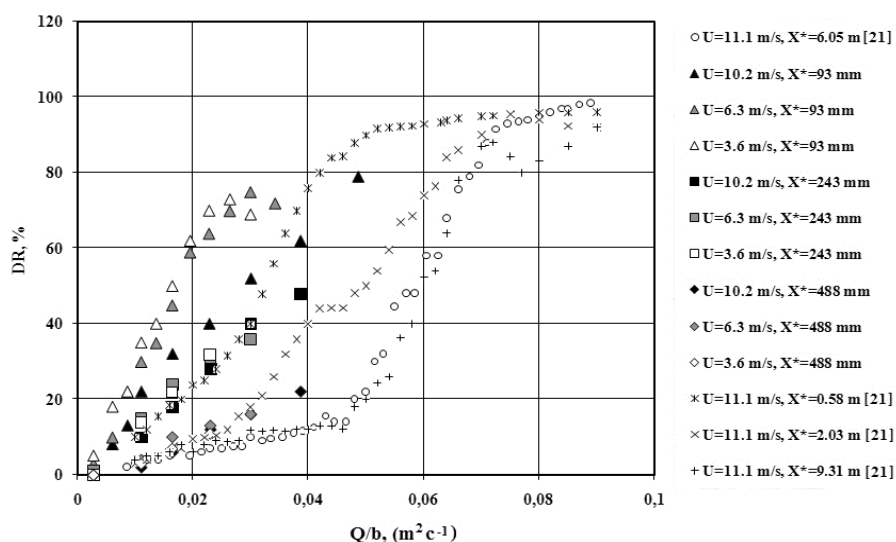
При росте расхода газа объемная концентрация пузырьков в пограничном слое увеличивается, а их коалесценция приводит к образованию крупных пузырей величиной порядка толщины пограничного слоя, которые характеризуют переход к пленочно-пузырьковому режиму. Для иллюстрации особенностей такого перехода на рис. 4 показано относительное распределение по толщине пограничного слоя крупных пузырей $D_{\max} \approx (V_g T_i)$ по сравнению со средним диаметром пузырьков $D \approx (U_g \Delta t)$ для $Q = 3.2$ л/с, $X^* = 50 - 200$ мм и трех скоростей потока, где U_g - средняя скорость газовой фазы, которая меньше скорости жидкости не более, чем на 30% (Fontaine, 2005), T_i - максимальная длительность импульсов фототока, Δt - средняя длительность импульсов фототока. В первом приближении принято равенство скоростей газовой фазы различных размеров. За время измерений доля крупных пузырей $D_{\max}$ типа пленок в двухфазном пограничном слое на нижней стенке составляла около $\sim(5-15)\%$ и более в зависимости от удельного расхода газа, а на верхней стенке доля крупных пузырей существенно выше при тех же условиях. Отношение $D_{\max}/D$ имеет максимум вблизи стенки, который уменьшается по величине пропорционально уменьшению скорости потока. При удалении от стенки размер газовых образований быстро уменьшается до величины среднего диаметра пузырьков на внешней границе из-за разрушения пленок турбулентным потоком в ядре пограничного слоя. Средний диаметр пузырьков составлял по нашим оценкам (360-460) мкм для скорости потока $U = 10.2$ м/с ($X^* = 93$ мм), а максимальный устойчивый диаметр пузырьков в турбулентном потоке при этих условиях соответствовал 323 мкм (Hinze, 1955), весьма близкий к измеренному. При фотографировании пузырьков в подобных условиях при $U = 10.7$ м/с, $X^* = 76$ мм получено $D \approx 340/400$ мкм (top/bottom) (Pal et al., 1988). Вниз по потоку средний размер увеличивается за счет слияния пузырьков, а максимальный размер пленочных образований уменьшается под действием турбулентных пульсаций жидкости. Поэтому вниз по потоку на расстоянии $X^* = 200$ мм их отношение существенно сократилось, а при $X^* = 445$ мм в пограничном слое на нижней стенке (в отличие от верхней стенки) крупные пленочные образования не наблюдались.



Фиг. 4. Относительное распределение максимально крупных пузырей (пленок) в турбулентном пограничном слое при $X^* = 50, 200$ мм и $Q = 3.2$ л/с.



(a)



(б)

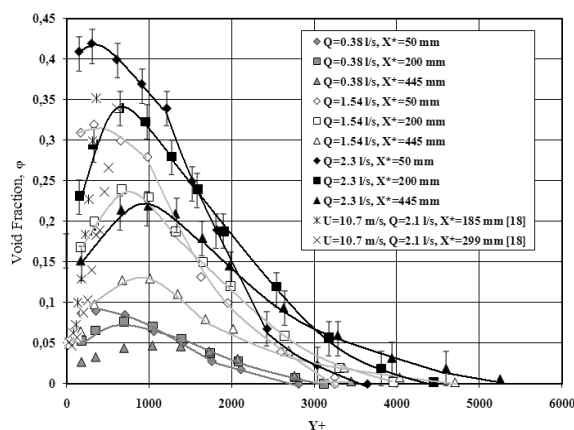
Фиг. 5 а, б. Зависимости эффекта снижения трения на верхней стенке (а) и нижней стенке (б) от удельного расхода газа.

На рис 5 а, б (top/bottom) показаны результаты измерений снижения трения $DR = (1 - \tau_w / \tau_{w0}) \times 100\%$ в зависимости от удельного расхода газа. Для сравнения на графике представлены результаты измерений на пластине при $U = 10.7$ м/с (Elbing et al., 2008). Анализ показал, что для $DR > 20\%$ граничное значение удельного расхода газа для перехода к пленочно-пузырьковому режиму (q_{trans}) тем выше, чем больше скорость жидкости и расстояние вниз по потоку за газогенератором. Пленочный режим течения в наших опытах не был реализован, хотя режим $Q = 4.2$ л/с при $U = 6.3$ м/с соответствовал критическому удельному расходу газа ($q_{crit} \approx 0.03$ м² с⁻¹). Причиной, по-видимому, была недостаточная длина рабочей части, поскольку формирование

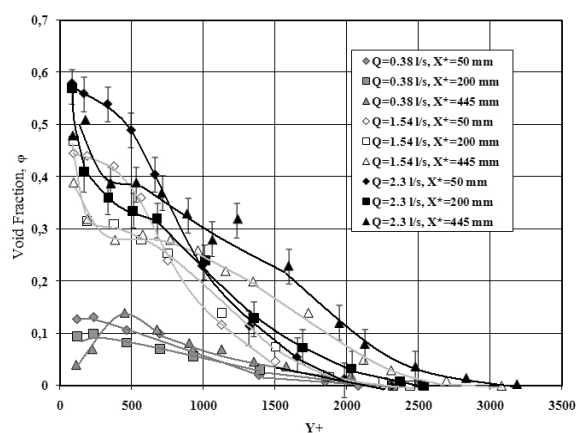
сплошной газовой пленки на верхней стенке канала происходит путем слияния пузырьков газа в некоторой переходной зоне за газогенератором. По той же причине при $U=3.6$ м/с и расходах газа $Q>2$ л/с ($q>q_{crit}$) мы наблюдали только переходный пленочно-пузырьковый режим. Следует отметить, что для **нижней** стенки канала при пленочно-пузырьковом режиме течения усиливается эффект плавучести газовой фазы, пузырьки уходят из пристенной зоны пограничного слоя и эффект снижения трения быстро теряется вниз по потоку. При **верхней** ориентации стенки в пленочно-пузырьковом режиме газовая фаза движется к стенке, а крупные пузырьки ускоряют процесс образования сплошной газовой пленки с большим снижением трения при достаточном расстоянии вниз по потоку.

3.3. Профили концентрации газа в двухфазном пограничном слое.

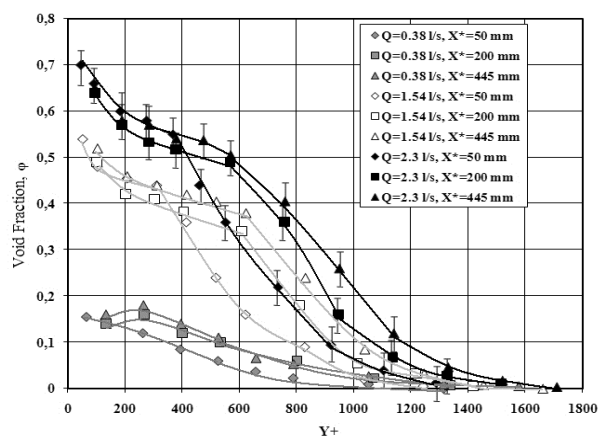
Измерения профилей объемной концентрации газовой фазы ϕ проведены при трех скоростях потока на расстояниях $X^*=50, 200$ и 445 мм в турбулентном пограничном слое на нижней и верхней стенках канала. Результаты показаны на фиг. 6 а, б, с и фиг. 7 а, б, с в универсальных координатах стенки. Здесь по оси абсцисс отложено безразмерное расстояние от стенки канала $Y^+=Yu^+/v$, причем u^+ учитывает снижение локального трения при заданном расходе газа. По оси ординат отложена ϕ - локальная концентрация газа. На фиг. 6 а, б, с показаны профили концентрации газа для **верхней** стенки канала при $U=10.2, 6.5$ и 3.6 м/с соответственно, а на фиг. 7 а, б, с - для **нижней** стенки при тех же скоростях потока. Профили концентрации газа в турбулентном пограничном слое зависят от расхода газа, скорости потока, расстояния за газогенератором, гравитационной ориентации стенки и продольного градиента давления, который существенно отличается для внутреннего течения в гидродинамическом тоннеле от внешнего обтекания тела или пластины.



(a)

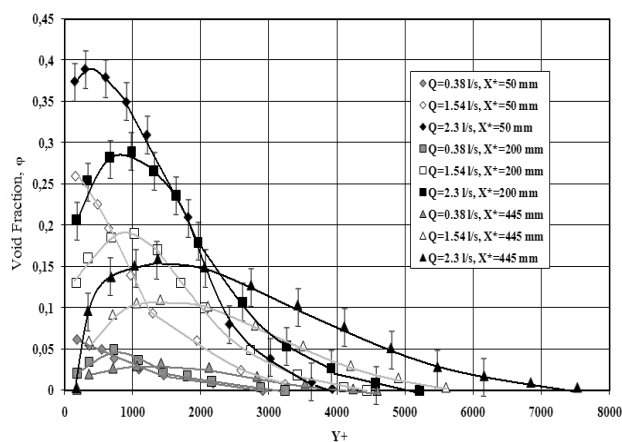


(b)

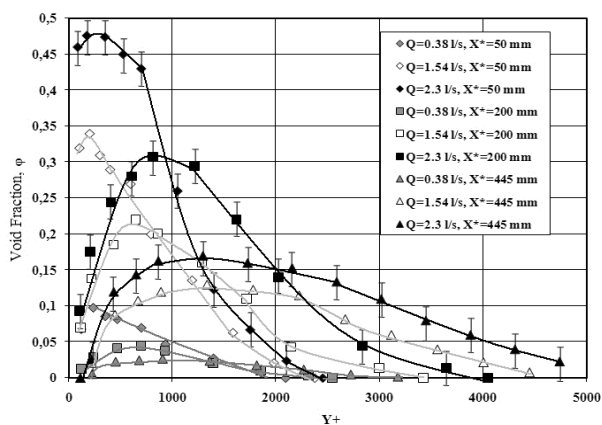


(c)

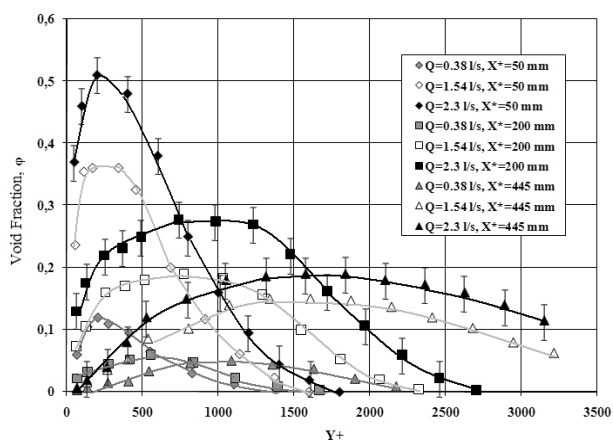
Фиг. 6 а, б, с. Профили объемной концентрации газа по толщине газонасыщенного слоя жидкости в универсальных координатах на верхней (top) стенке канала при различных расходах газа, расстояниях вниз по потоку X^* и при скоростях потока: 6 а - $U = 10.2$ м/с, 6 б - $U = 6.5$ м/с, 6 с - $U = 3.6$ м/с.



a)



б)



с)

Фиг. 7 а, б, с. Профили объемной концентрации газа по толщине газонасыщенного слоя жидкости в универсальных координатах на нижней (bottom) стенке канала при различных расходах газа, расстояниях вниз по потоку X^* и при скоростях потока: 7 а - $U = 10.2$ м/с, 7 б - $U = 6.3$ м/с, 7 с - $U = 3.6$ м/с.

Вблизи газогенератора ($X^*=50$ мм) профили концентрации газа на нижней и верхней стенках канала подобны по форме, но отличаются по величине. Они имеют пик вблизи **нижней** стенки на расстоянии $Y^+=100-200$, в зависимости от скорости потока, а для **верхней** стенки - на расстоянии $Y^+=50-200$. При увеличении скорости потока растет безразмерное расстояние от стенки до пика концентрации, причем величина пика вблизи верхней стенки больше, чем для нижней стенки. Для **верхней** стенки максимум концентрации газа при низких скоростях находится в буферной зоне пограничного слоя, вниз по потоку он изменяется незначительно, что и определяет высокий уровень снижения трения.

При больших скоростях ($U>10$ м/с) процессы диффузии вниз по потоку приводят к удалению максимума концентрации газа от верхней стенки, но значительно медленнее, чем от нижней стенки. Профили концентрации газа для $q < q_{trans}$ при этом в значительной степени выравниваются, что приводит к близким эффектам снижения трения на нижней и верхней стенках канала.

Основной причиной изменений в распределении газа в двухфазном пограничном слое является эффект плавучести, влияние которого усиливается при уменьшении скорости потока, увеличении расхода газа (особенно при $q > q_{trans}$), и изменении гравитационной ориентации стенки. Пузырьки направляются ближе к **верхней** стенке, увеличивая концентрацию газа в буферной зоне, и уменьшая ее во внешней области пограничного слоя. Эффект снижения трения при этом увеличивается. На **нижней** стенке плавучесть пузырьков, наоборот, приводит к уменьшению концентрации газа в буферной зоне, и увеличению ее во внешней области пограничного слоя. Эффект снижения трения (см. фиг. 3) при этом быстро теряется. В дальних сечениях пограничного слоя при скоростях потока $U<10$ м/с профили концентрации газа на нижней и верхней стенках канала существенно отличаются. На **верхней** стенке профили концентрации газа при $q > q_{trans}$ имеют три характерные зоны: буферную зону вблизи стенки с максимальной концентрацией газа, к ней примыкает зона с минимальным градиентом концентрации, и далее - внешнюю зону с уменьшением концентрации газа до нуля на верхней границе пузырькового слоя. На **нижней** стенке профили концентрации газа имеют следующие особенности: вниз по потоку максимум концентрации газа удаляется от стенки, уменьшается, и переходит в плоскую вершину с зоной минимального градиента.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕХАНИЗМА ВЛИЯНИЯ ГАЗОНАСЫЩЕНИЯ НА ПРИСТЕННУЮ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ И СНИЖЕНИЕ ТРЕНИЯ

Известно, что процессы генерации турбулентности в однофазном потоке, определяющие трение на стенке, связаны с перемежающимися выбросами завихренной жидкости из вязкого подслоя в буферную область пограничного слоя. Наибольшие турбулентные касательные напряжения возникают вблизи стенок у внутренней границы турбулентного ядра. Турбулентные касательные напряжения имеют место во время разрушения вязкого течения; физически они являются результатом выброса струй из пристенной области и связаны с изменением скорости потока поперек области разрушения. Вязкий подслей, имеющий малую толщину ($Y^+ \approx 10$), оказывает решающее влияние на развитие течения, и особенно на возникновение сопротивления, так как явления, происходящие в подслое, вызывают касательные напряжения на стенке, а вместе с ними и сопротивление трения (Kline et al., 1967, Robinson, 1991, Adrian et al., 2000).

Анализ представленных материалов, а также более ранних экспериментальных и теоретических работ показывает, что при газонасыщении пограничного слоя снижение

локального трения зависит, главным образом, от концентрации газа в буферной зоне, которая уменьшает плотность смеси, увеличивает ее эффективную вязкость и, как следствие, модифицирует турбулентность при взаимодействии пузырей с вихревой пеленой в пристенной зоне пограничного слоя, что приводит к изменению пространственно-временной динамики и организации пристенных вихревых структур.

В случае течения вдоль верхней стенки можно выделить три режима газожидкостного потока в зависимости от удельного расхода газа: пленочный ($q > q_{crit}$), переходный пленочно-пузырьковый ($q > q_{trans}$) и пузырьковый. Для пленочного режима («газовой смазки») характерно максимальное $\sim(90 \pm 10)\%$ снижение трения, где трение в жидкости заменяется существенно меньшим трением в газе (см. Elbing et al., 2008).

Для переходного пленочно-пузырькового режима концентрация пузырьков в пристенной зоне определяется переносом жидкостью, турбулентным смешиванием (диффузией) и плавучестью, действие которой усиливается при уменьшении скорости потока, особенно при $q > q_{trans}$. Экспериментальные данные показали, что пленочно-пузырьковый режим течения газожидкостной смеси в турбулентном пограничном слое на **верхней** стенке более устойчив, чем на нижней стенке. Его длина по потоку тем больше, чем ниже скорость жидкости и выше расход газа, а характерная максимальная концентрация газовой фазы вблизи от стенки достигает $70 \pm 10\%$ с максимальным снижением трения такого же порядка.

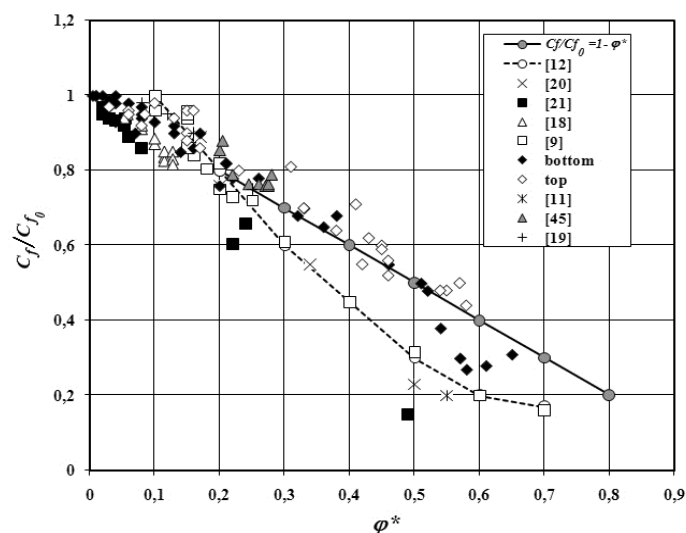
Характерная концентрация газовой фазы в пристенной зоне турбулентного пограничного слоя для пузырькового режима не превышает $25 \pm 5\%$ со снижением локального трения такой же величины ($25 \pm 5\%$).

В пограничном слое на **нижней** стенке при газонасыщении в обычных условиях самый эффективный пленочный режим не реализуется, за исключением кавитации при очень больших скоростях потока (см. Сессіо, 2010). Наши измерения подтвердили, что уровень снижения трения на **нижней** стенке быстро уменьшается с его пикового уровня ($\sim 80\%$), характерного для пленочно-пузырькового режима, до $\sim 5\text{-}20\%$ соответствующего пузырьковому режиму на расстоянии $X^*/\delta \approx 25\text{-}34$. Причиной потери эффективности пленочно-пузырькового режима является разрушение крупных газовых пленок турбулентными пульсациями жидкости, с одной стороны, и действие сил плавучести, которые приводят к удалению газовой фазы от стенки, с другой стороны. Кроме того, в самой непосредственной близости от стенки на пузырьки действует в поперечном направлении сила Сэффмена, которой достаточно чтобы преодолеть плавучесть и отодвинуть пузырьки как от нижней, так и от верхней стенки на расстояние порядка его диаметра (Дубнищев и др., 1975, Pal et al., 1988, Sanders et al., 2006, Elbing et al., 2008).

Следует отметить, что пузырьковый и пленочно-пузырьковый режимы течения газожидкостной смеси в турбулентном пограничном слое обладают той или иной степенью неустойчивости, характерной чертой которой являются процессы слияния и разрушения газовой фазы. Характерные размеры пузырьков в опытах составляли по нашим оценкам $0.5\text{-}1.5$ мм ($d^+ < 200$), а размеры пленок достигали в длину $\sim 30\text{-}40$ мм и более, а в поперечном направлении на порядок меньше ($\sim 3\text{-}5$ мм) в зависимости от скорости потока, расхода газа и гравитационной ориентации стенки.

На фиг. 8 показаны результаты измерений, в которых относительное снижение трения является функцией Φ^* , то есть средней концентрации пузырьков газа во внутренней области турбулентного пограничного слоя ($Y^+ < 200$). Здесь прямая 1 (сплошная линия) соответствует изменению плотности смеси в указанной зоне пограничного слоя, а кривая 2

(пунктирная линия) - теоретической зависимости, учитывающей изменение плотности смеси, увеличение ее эффективной вязкости и модификации турбулентности (Legner, 1984). Все известные экспериментальные данные по снижению трения с помощью пузырькового газонасыщения хорошо обобщаются зависимостью от концентрации газа φ^* , которая является ключевым параметром. Это подтверждает гипотезу, что основными процессами при снижении трения с помощью пузырькового метода являются уменьшение



Фиг. 8. Зависимость эффекта снижения трения при газонасыщении от средней концентрации газа φ^* во внутренней области турбулентного пограничного слоя ($Y^+ < 200$).

плотности смеси вблизи стенки, увеличение ее эффективной вязкости, а также модификация турбулентности при взаимодействии пузырей с вихревой пеленой во внутренней области пограничного слоя и процессы слияния - разрушения газовой фазы.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С применением датчиков локального трения типа «плавающая стенка», волоконно-оптического датчика проведены исследования эффекта снижения трения и распределения газовой фазы при газонасыщении турбулентного пограничного слоя на верхней и нижней стенках во входном участке канала.

Показано, что ключевым параметром для снижения трения с помощью пузырькового газонасыщения является концентрация газовой фазы в буферной зоне пограничного слоя, величина которой определяется расходом газа, скоростью жидкости, расстоянием вниз по потоку за газогенератором и гравитационной ориентацией стенки. Это подтверждает гипотезу, что основными процессами в механизме снижения трения для пузырькового метода в диапазоне средних размеров газовой фазы ($30 < d^+ < 200$) являются: уменьшение плотности смеси в буферной зоне пограничного слоя, увеличение ее эффективной вязкости, модификация

турбулентности при взаимодействии пузырей с вихревой пленкой в пристенной зоне пограничного слоя и процессы слияния - разрушения газовой фазы.

Профили концентрации газовой фазы сразу за газогенератором имеют максимум вблизи стенки, который увеличивается с ростом расхода газа до ~70% и более. Увеличение концентрации в пристенной зоне приводит к интенсивной коалесценции пузырьков, в результате которой течение в двухфазном пограничном слое переходит в пленочно-пузырьковый режим с характерным усилением эффекта плавучести газовой фазы, особенно при низких скоростях потока. Формы профилей концентрации газа на верхней и нижней стенках канала отличаются тем, что вниз по потоку под действием эффекта плавучести максимум концентрации сохраняется на высоком уровне вблизи верхней стенки, определяя высокий уровень снижения трения; а от нижней стенки пик концентрации удаляется, уменьшается, и переходит в плоскую вершину, что приводит к быстрой потере эффекта снижения трения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 10-01-00174.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

U - скорость основного потока,

X – расстояние от входа в рабочий канал до данной точки (продольная координата точки),

X^* - расстояние от задней кромки газогенератора до данной точки,

Y - координата точки по нормали к стенке,

b - ширина газогенератора,

Q – суммарный объемный расход газа,

Q^* - объемный расход газа при максимальном снижении трения на стенке,

$\beta=Q/(Q+Q_w)$ - безразмерный расход газа,

$Q_w=U_b(\delta - \delta^*)$ - расход жидкости в пограничном слое,

$q= Q /b$ - удельный расход газа,

q_{trans} - удельный расход газа, соответствующий переходу в пленочно-пузырьковый режим газожидкостной смеси,

q_{crit} - удельный расход газа, соответствующий переходу в пленочный режим газожидкостной смеси,

D — средний диаметр пузырьков, мм

D_{max} –диаметр максимально крупных пузырьков, мм

$d^+=Du^+/\nu$ - безразмерный диаметр пузырьков,

$Re_x = UX/\nu$ - число Рейнольдса,

ρ - плотность жидкости,

ν - кинематическая вязкость жидкости,

δ - толщина однофазного пограничного слоя,

δ^* - толщина вытеснения однофазного пограничного слоя,

τ_{w0} , τ_w – касательные напряжения на стенке в одно- и двухфазном потоках,

$u^+ = (\tau_w / \rho)^{0.5}$ - динамическая скорость,

$y^+ = Yu^+ / \nu$ - безразмерное расстояние от стенки,

φ – локальная объемная концентрация газовой фазы,

φ^* - средняя концентрация газа во внутренней области турбулентного пограничного слоя ($Y^+ < 200$),

$C_f = \tau_w / (0.5 \rho U^2)$ и $C_{f0} = \tau_{w0} / (0.5 \rho U^2)$ - коэффициенты локального трения в двухфазном и однофазном потоках,

C_f / C_{f0} – отношение коэффициентов локального трения на стенке канала в двухфазном и однофазном потоках,

$DR = (1 - \tau_w / \tau_{w0}) \times 100\%$ - безразмерный коэффициент снижения трения на стенке

ЛИТЕРАТУРА

1. Adrian, R.J., Meinhart, C.D. and Tomkins, C.D. (2000) Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer. *J. Fluid Mech.* 422, pp. 1-54.
2. Bogdevich, V.G., Maltzev, L.I., Maluga, A.G. (1998) Optimisation of The Distributed Gas Injection into a Turbulent Boundary Layer for The Drag Reduction, *Proceedings of the International Symposium on Seawater Drag Reduction*, 22-23 July 1998, Newport, Rhode Island, pp. 327-330.
3. Ceccio, L.S. (2010) Friction Drag Reduction of External Flows with Bubble and Gas Injection. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 42, pp. 183-203.
4. Дубнищев Ю.Н., Евсеев А.Р., Соболев В.С., Уткин Е.Н. (1975) Исследование газонасыщенных турбулентных потоков с применением лазерного доплеровского измерителя скорости. *ПМТФ* 1, с. 147-153.
5. Евсеев А.Р. (1982) Лазерный доплеровский измеритель скорости со световодом. *Автометрия* 3, с. 109-111.
6. Евсеев А.Р., Тимкин Л.С. (1983) Разработка лазерного анемометра с волоконным световодом для измерения концентрации и скорости пузырьков в аэрированных потоках. *ВИНИТИ*, 1983, № 0183002216, 95 с.
7. Евсеев А.Р., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Тачков С.А., Тимкин Л.С. (1987) Измерение структурных характеристик газожидкостного потока лазерным анемометром с волоконным световодом. *Автометрия* 2, с. 69-73.
8. Федяевский К.К. (1943) Уменьшение сопротивления трения путем изменения физических констант жидкости у стенки. *Изв. АН СССР, ОТН*, 9-10, с. 70-78.
9. Мигиренко Г.С., Евсеев А.Р. (1974) Турбулентный пограничный слой с газонасыщением. В кн.: *Проблемы теплофизики и физической гидродинамики*, Новосибирск: «Наука», 1974, с. 132-144.

10. Ferrante, A. and Elghobashi, S. (2004) On the physical mechanisms of drag reduction in a spatially developing turbulent boundary layer laden with microbubbles. *J. Fluid Mech.* 503, pp. 345-355.
11. Богдевич В.Г., Малюга А.Г. (1976) Распределение поверхностного трения в турбулентном пограничном слое за местом вдува газа. В кн.: Исследования по управлению пограничным слоем, Новосибирск, Институт теплофизики СО АН СССР, с. 62-70.
12. Legner, H.H. (1984) A simple model for gas bubble drag reduction. *Phys. Fluids* 27, 2788-2790.
13. Hinze, J.O. (1955) Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes. *AIChE J.* 1, pp. 289-295.
14. A. Kitagawa, K. Hishida, Y. Kodama (2005) Flow structure of microbubble-laden turbulent channel flow measured by PIV combined with the shadow image technique. *Exp. Fluids* 38, pp. 466-475.
15. Kline, S.L., Reynolds, W.C., Schraub, F.A. & Rundstadler, P.W. (1967) The structure of turbulent boundary layers. *J. Fluid Mech.* 30, pp. 741-773.
16. Madavan, N.K., Deutsch, S. and Merkle, C.L. (1985a) Measurements of local skin friction in a microbubble-modified turbulent boundary layer. *J. Fluid Mech.* 156, pp. 237-256.
17. Kodama, Y., Takahashi, T., Hori, T., Makino, M., and Ueda, T. (2004) Characteristics of microbubble drag reduction on 50m-long flat plate. 3rd Int. Symp. on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation, 22-25 September 2004, Pisa, Italy.
18. Guin, M.M., Kato, H., Yamaguchi, H. (1996) Reduction of skin friction by microbubbles and its relation with near-wall bubble concentration in a channel. *Journal of Marine Science and Technology* 1, pp. 241-254.
19. Fontaine, A.A., Petrie, H.L., DeVilbiss, D.W., Money, M.J. and Deutsch, S. (2005) Void fraction and velocity probe for micro-bubble flow. *Proc. 2nd Symp. on Seawater Drag Reduction*, Busan, Korea, 23-26 may 2005, pp. 391-404.
20. Sanders, W.C., Winkel, E.S., Dowling, D.R., Perlin, M. & Ceccio, S.L. (2006) Bubble friction drag reduction in a high-Reynolds-number flat-plate turbulent boundary layer. *J. Fluid Mech.* 552, pp. 353-380.
21. Elbing, B.R., Winkel, E.S., Lay, K.A., Ceccio, S.L., Dowling, D.R., and Perlin, M. (2008) Bubble-induced skin-friction drag reduction and the abrupt transition to air-layer drag reduction. *J. Fluid Mech.* 612, pp. 201-236.
22. Kodama, Y., Hori, T., Makino, M., and Kawashima, H. (2005) A full scale microbubble experiment using a Cement Carrier, 5th General Meeting of NMRI, (in Japanese) <http://www.nmri.go.jp/main/publications/paper/pdf/2A/05/00/pnm2A050037-00.pdf> (2005)
23. Лисицин В.Н., Орлов В.А., Фомин Ю.Н., Чеботаев В.П. (1980) Лазерный доплеровский измеритель скорости непрозрачных потоков жидкости и частиц. В кн: Труды 3-го Всесоюзного совещания «Экспериментальные методы и аппаратура для исследования турбулентности», Новосибирск, Институт теплофизики СО АН СССР, 1980, с. 41-43.
24. Лойцянский Л.Г. (1942) Об изменении сопротивления тел путем заполнения пограничного слоя жидкостями с другими физическими константами. *ПММ* 6, с. 95-99.

Journal of International Scientific Publications:
Materials, Methods & Technologies, Volume 6, Part 3

25. Lu, J., Fernandez, A. & Truggvason, G. (2005) The effect of bubbles on the wall drag of a turbulent channel flow. *Phys. Fluids* 17: 095102-12.
26. Lumley, J.L. (1977) Drag reduction in two-phase and polymer flows. *Phys. Fluids* 20, Part II (10), pp. 564-571.
27. M.K. Madavan, S. Deutsch, C.L. Merkle (1984) Reduction of turbulent skin friction by microbubbles, *Phys. Fluids* 27, pp. 356-363.
28. Madavan, N.K., Merkle, C.L. and Deutsch, S. (1985b) Numerical investigations into the mechanisms of microbubble drag reduction. *Journal of Fluids Engineering* 107, pp. 370-377.
29. Мальцев Л.И., Гузевский Л.Г., Кулик В.М., Малюга А.Г., Новиков Б.Г., Семёнов Б.Н. (2000) Некоторые вопросы морской гидродинамики (обзор), *Теплофизика и аэромеханика* 7 (3), с. 319-338.
30. Maltzev, L.I. (1995) Jet Methods of Gas Injection into Fluid Boundary Layer for Drag Reduction. *Applied Scientific Research* 54, pp. 281-291.
31. Мальцев Л.И., Малюга А.Г., Новиков Б.Г. (2006) О возможных механизмах воздействия пузырьков газа на характеристики турбулентного пограничного слоя. *Теплофизика и аэромеханика* 13 (3), с. 417-424.
32. Marie, J.L. (1987) A simple analytical formulation for microbubble drag reduction. *Physicochem. Hydrodyn.* 8, pp. 213-220.
33. McCormic, M.E., Bhattacharyya, R. (1973) Drag reduction of a submersible hull by electrolysis. *Naval Engineers J.* 85 (2), pp. 11-16.
34. Meng, J.C.S. & Uhlman, J.S. (1998) Microbubble formation and splitting in turbulent boundary layer for turbulence reduction. *Proceedings of the International Symposium on Seawater Drag Reduction*, 22-23 July 1998, Newport, Rhode Island, pp. 341-355.
35. Merkle, C.L., Deutsch, S. (1992) Microbubble Drag Reduction in Liquid Turbulent Boundary Layers. *Applied Mechanics Review* 45, pp. 103-127.
36. K. Mohanarangama, Cheunga S.C.P., Tua J.Y., and Chenb L. (2009) Numerical simulation of micro-bubble drag reduction using population balance model. *Ocean Eng.*, 36 (11), pp. 863-886.
37. Murai, Y., Oishi, Y., Takeda, Y., Yamamoto, F., (2006) Turbulent shear stress profiles in a bubbly channel flow assessed by particle tracking velocimetry. *Exp. in Fluids* 41, pp. 343-352.
38. Y. Murai, H. Fukuda, Y. Oishi, Y. Kodama and F. Yamamoto (2007) Skin friction reduction by large air bubbles in a horizontal channel flow. *Int. J. of Multiphase Flow* 33, pp. 147-163.
39. Nagamatsu, T., Kodama, Y., Kakugawa, A., et al. (2002) A full-scale experiment on microbubbles for skin friction reduction using "SEIUN MARU" Part 2: The Full-scale Experiment. *J. of Soc. Naval Architects of Japan* 192, pp. 15-28 (in Japanese).
40. Pal, S., Merkle, C.L. & Deutsch, S. (1988) Bubble characteristics and trajectories in a microbubble boundary layer. *Phys. Fluids* 31, pp. 744-751.
41. S.K. Robinson (1991) Coherent motions in the turbulent boundary layer. *Annu. Rev. Fluid Mechanics* 23, pp. 601-639.
42. Sibree J.O. (1934) *Trans. Far. Soc.* 30, p. 325.

Journal of International Scientific Publications:
Materials, Methods & Technologies, Volume 6, Part 3

43. P.V. Skudarnov and C.X. Lin (2006) Drag reduction by gas injection into turbulent boundary layer: Density ratio effect. *Int. J. of Heat and Fluid Flow* 27, pp. 436-444.
44. Takahashi, T., Kakugawa, A., Makino, M., and Kodama, Y. (2003) Experimental study on scale effect of drag reduction by microbubbles. *J. of the Kansai Society of Naval Architects, Japan*, 239 (in Japanese).
45. Kodama, Y., Kakugawa, A., Takahashi, T., Kawashima, H. (2000) Experimental study on microbubbles and their applicability to ships for skin friction reduction. *Int. J. Heat and Fluid Flow* 21, pp. 582-588.
46. Watanabe, O., Masuko, A., and Shirose, Y. (1998) Measurements of drag reduction by microbubbles using very long ship models. *J. of Soc. Naval Architects of Japan* 183, pp. 53-63 (in Japanese).
47. Xu, J., Maxey, M.R. and Karniadakis, G.E. (2002) Numerical simulation of turbulent drag reduction using micro-bubbles. *J. Fluid Mech.* 468, pp. 271-281.
48. J.O. Villafuerte and Y.A. Hassan (2006) Investigation of microbubble boundary layer using particle tracking velocimetry. *J. of Fluids Engineering* 129, pp. 66-79.