



УДК 532. 517. 4: 66. 001  
ГРНТИ.30.17.35

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ТЕПЛОБМЕННИКАХ ГАЗОДОБЫВАЮЩИХ СТАНЦИЙ



*С.В. УЛЬШИН, кандидат технических наук, доцент  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»  
(г. Воронеж)*

*И.А. КАЗЬМИН  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»  
(г. Воронеж)*

В статье показана перспективность применения диффузионного метода для определения коэффициентов трения как в условиях плоскопараллельного и прямолинейно-параллельного течения, так и при безнапорном течении в аппаратах (реакторах) с механическим перемешиванием. Приведено сравнение результатов расчета и экспериментальных данных. Установлено хорошее согласие между ними.

*Ключевые слова:* коэффициенты трения, турбулентное течение.

### THE LOCAL FRICTION COEFFICIENTS DETERMINING METHOD FOR TURBULENT FLOW OF VISCOUS FLUID IN THE HEAT GAS STATION

*S.V. UL'SHIN, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)*

*I.A. KAZMIN  
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)*

Diffusion Method Promising Application is shown for the friction coefficients determining in terms of plane parallel and straightforward parallel flow in the units (reactors) with mechanical agitation. The calculation results and experimental data comparison is given. The good accordance between them is identified.

*Keywords:* friction coefficients, turbulent flow.

**Введение.** Объектом исследования являются системы контроля параметров функционирования газодобывающих станций, стоящих на снабжении ВВС.

Цель работы – разработка математического аппарата для исследования гидродинамических характеристик криогенных газожидкостных потоков в теплообменных аппаратах транспортабельных кислородоазотдобывающих станций (ТКДС).



Для достижения цели работы использовались такие методы научного исследования как: анализ, синтез, логический подход.

В настоящее время ведутся разработки эффективных мобильных воздуходелительных установок (МВРУ) военного назначения.

Любая модернизация ГДС связанная с изменением её параметров, должна производиться с учётом того, что все явления переноса, протекающие в ГДС, взаимосвязаны между собой из-за наличия прямых и обратных связей между отдельными аппаратами технологической схемы. В связи с этим необходимо отметить, что увеличение производительности установки не может основываться на простом масштабировании аппаратов.

Как показал анализ современных образцов воздуходелительных установок основным определяющим моментом их функционирования является гидродинамический режим течения гомогенных и гетерогенных потоков. В частности, так как необратимые потери энергии от гидравлических потерь при движении технологических сред по трактам ГДС составляют достаточно большую величину, необходимо уточнение расчётных зависимостей для потерь напора на трение при движении потоков. Таким образом, актуальной задачей является уточнение методик расчёта гидравлического сопротивления при движении сред в каналах аппаратов ГДС, имеющих различную форму при разных режимах течения.

Решение задач конвективного тепло- и массообмена, ряда аэромеханических задач связано с использованием локальных коэффициентов трения  $C_f = 2\tau_0/\rho U^2$ .

Касательные напряжения  $\tau_0$  на стенке в случае одинаковых коэффициентов трения на границах исследуемой области обычно находят измерением потери статического давления на рабочем участке. В каналах с более сложной геометрией (кольцевые, плоские, призматические), в реакторах с перемешиванием гидравлические сопротивления отдельных зон различны. Поэтому по потере давления в отсутствии дополнительной информации возможно определение некоторого эффективного коэффициента трения, осредненного по всей поверхности.

Для количественной оценки  $C_f$  отдельных рабочих участков перспективно применение диффузионного метода, основанного на использовании решения дифференциального уравнения переноса субстанции в вязком подслое [1]

$$\bar{Sh} = 0,115 \operatorname{Re} \sqrt{\frac{C_f}{2}} \operatorname{Sc}^{0,25} \left[ \operatorname{cth} \left( 1,17 \xi_L^{0,5} \right) \right]^{2/3}, \quad (1)$$

где  $\bar{Sh}$  - число Шервуда, осредненное по рабочей поверхности,  $\bar{Sh} = \frac{\beta d}{D}$ ;  $\operatorname{Re}$  -

число Рейнольдса,  $\operatorname{Re} = \frac{Ud}{\nu}$ ;  $\operatorname{Sc}$  - число Шмидта,  $\operatorname{Sc} = \frac{\nu}{D}$ ;  $\beta$  - коэффициент массоотдачи, м/с;  $d$  - характерный размер, м;  $U$  - характерная скорость, м/с;  $\nu$  - кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;  $D$  - коэффициент молекулярной диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $L$  - протяженность рабочего участка в направлении течения, м;  $\xi_L$  - безразмерная длина рабочего участка,

$$\xi_L = 2,1 \cdot 10^{-3} \operatorname{Re} \sqrt{\frac{C_f}{2}} \operatorname{Sc}^{0,25} \frac{L}{d}. \quad (2)$$

Коэффициенты массоотдачи находят измерением диффузионных потоков при растворении исследуемой поверхности участков из впрыснутого в паз плохо растворимого порошкообразного вещества. В опытах используется, в частности, бензойная кислота и водноглицериновые растворы. Необходимо при этом подчеркнуть, что физи-



ко-химические свойства этой системы включая плотность, вязкость, растворимость, коэффициенты диффузии при различной массовой доле глицерина хорошо изучены [2]. Определяют коэффициенты массоотдачи также на основе значений предельного диффузионного тока окислительно-восстановительной реакции на электроде, смонтированном заподлицо с рабочей поверхностью [3]. Традиционно в этих работах исследуют реакцию окисления – восстановления ферро-феррицианида калия в водных растворах гидроксида натрия, физико-химические характеристики системы представлены в литературе [4].

Значения  $C_f$  тем ближе к локальным, чем меньше площадь датчика. В частности он работает в условиях начального диффузионного участка (турбулентный перенос вещества практически отсутствует, если его безразмерная протяженность в направлении течения  $\xi_L < 0,2$ ).

В этом случае формула (1) переходит в известное решение Левека

$$\bar{Sh} = 0,81 \left( Re^2 Sc \frac{C_f \cdot d}{2} \cdot \frac{d}{L} \right)^{1/3}, \quad (3)$$

из которого следует соотношение для вычисления  $C_f$

$$C_f = 3,76 \frac{\bar{Sh}^3}{Sc Re^2} \cdot \frac{L}{d}. \quad (4)$$

С увеличением  $Re$  вклад начального участка в диффузионный поток снижается. Это проявляется в плавном росте показателя степени при числе Рейнольдса, который достигает некоторого предельного значения в условиях развитого диффузионного пограничного слоя ( $\xi_L \geq 3$ ).

При  $\xi_L \geq 3$  множитель

$$\left[ \text{cth}(1,17 \xi_L^{0,5}) \right]^2$$

достигает предельной величины, равной единице, и (1) принимает вид

$$\bar{Sh} = 0.115 Re \sqrt{\frac{C_f}{2} Sc^{0,25}}, \quad (5)$$

откуда следует выражение для определения  $C_f$

$$\sqrt{\frac{C_f}{2}} = 8,69 \frac{Sh}{Re Sc^{0,25}}. \quad (6)$$

Естественно, (4) и (6) применимы при плоскопараллельном или прямолинейно-параллельном течении жидкости, когда определяющим размером служит диаметр канала (внутренняя задача), либо длина рабочего участка (датчика) в направлении течения в условиях внешней задачи. В первом случае под определяющей скоростью понимается средняя по сечению канала, во втором – скорость вдали от обтекаемой поверхности.



Для проверки рассмотренной концепции был использован экспериментальный материал, полученный методами растворения и электрохимическим в трубе круглого сечения, в кольцевых каналах в каналах прямоугольного сечения, в условиях цилиндра, вращающегося вокруг своей оси, при обтекании плоской поверхности. Значения  $\sqrt{C_f/2}$ , вычисленные по (4) и (6) и найденные прямыми измерениями потерь давления на трение, оказались в хорошем согласии между собой. Различие не превышает 3-4 %.

Осложняется задача с переходом к безнапорному течению, например, в реакторах с механическим перемешиванием. Разработка простого и надежного способа измерения  $\tau_0$  на внутренних стенках этих аппаратов представляет практический интерес, так как при известном распределении напряжений, с одной стороны, раскрываются резервы интенсификации процесса, проводимого в реакторе, и выявляются места, наиболее подверженные разрушению (коррозии, эрозии), – с другой. В этих условиях удобно использовать датчик в виде пластины или диска, вмонтированного заподлицо с поверхностью стенки. Здесь нельзя воспользоваться уравнением (1), так как в аппаратах с механическим перемешиванием неизвестна длина рабочего участка  $L$  в направлении течения, а, следовательно, и  $\xi_L$ . Тем не менее, это затруднение можно преодолеть следующим образом. Необходимо установить зависимость чисел Шервуда от  $Re = \frac{\omega d^2}{\nu}$  ( $\omega$ ,  $d$  – частота вращения и диаметр перемешивающегося устройства) при постоянном числе Шмидта.

На рисунке 1 в виде зависимости  $\lg \overline{Sh}$  от  $\lg Re$  предоставлен материал из [5], где изучали растворение неподвижного диска из бензойной кислоты, вмонтированного в дно реактора, снабженного двухлопастной мешалкой, при  $Sc = 930$ . Из рис. следует, что угловой коэффициент прямой

$$\lg \overline{Sh} = A + n \lg Re$$

в полном соответствии с (2) возрастает, достигая при  $Re \geq 1 \cdot 10^6$  предельного значения, равного 0,88, что свидетельствует о независимости диффузионного потока от  $\xi_L$ . Поэтому для вычисления  $C_f$  можно воспользоваться формулой (6) и опытными данными при  $Re \geq 1 \cdot 10^6$ . В результате такой обработки получено следующее соотношение:

$$C_f = 4,35 \cdot 10^{-3} Re^{-0,24}, \quad (7)$$

численный множитель в котором зависит от места расположения и конструкции датчика и перемешивающего устройства.

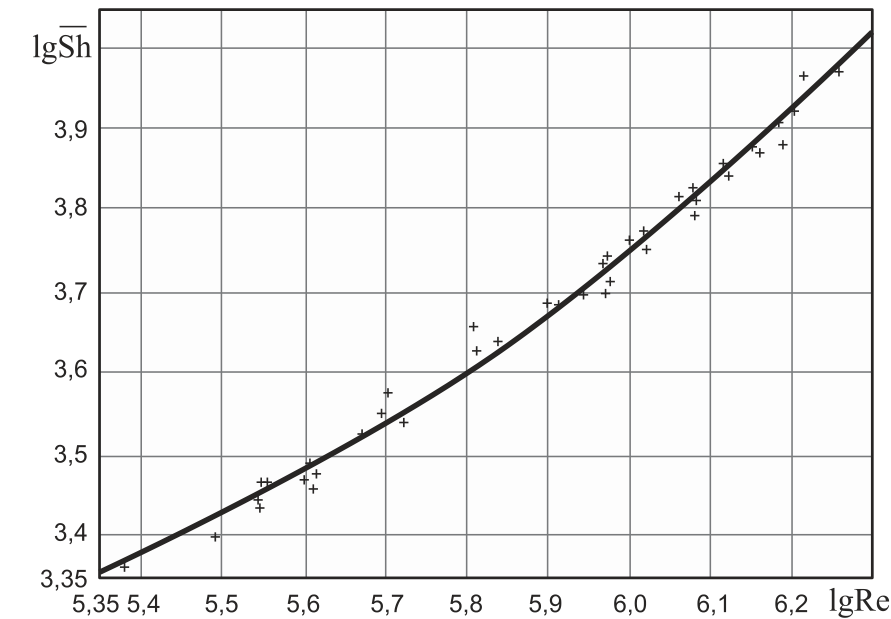


Рисунок 1 – Влияние интенсивности перемешивания жидкости на массоотдачу

На участке кривой в интервале чисел Рейнольдса  $4 \cdot 10^5 - 8 \cdot 10^5$  составляет 0,58. Эта величина находится в полном соответствии с соотношениями (3) и (7). Действительно после подстановки (7) в (3) формула (3) для начального диффузионного участка принимает следующую форму

$$\bar{Sh} = 0,64 Re^{0,58} \left( Sc \frac{d}{L} \right)^{1/3}. \quad (8)$$

Используя (8), можно легко вычислять  $L/d$  при безнапорном течении. В свою очередь, располагая зависимостью (7), найденным значением  $L/d$  легко рассчитать числа Шервуда для любых  $Re$ ,  $\xi_L$ ,  $Sc$ .

На рисунке 2 приведены результаты такого расчета (сплошная кривая), точками показаны экспериментальные данные из [7] для чисел Шмидта  $3,30 \cdot 10^2 - 1,1 \cdot 10^4$ . Как видно, согласие вполне удовлетворительное, отклонение не превышает 5 %.

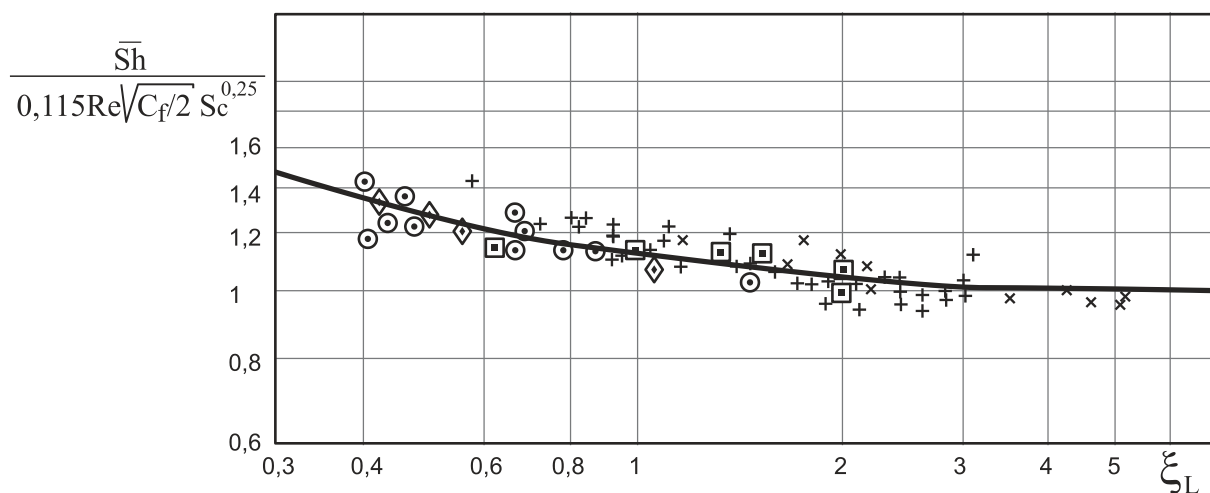


Рисунок 2 – Сравнение экспериментальных данных из [7] с рассчитанными по (1)



**Выводы.** В работе показана возможность применения диффузионного метода для определения коэффициентов трения при различных условиях течения жидкости в теплообменниках газодобывающих станций. Проведенное сравнение результатов расчета и экспериментальных данных показало хорошее согласие между ними.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корниенко Т.С. Массо- и теплоотдача при турбулентном течении вязких жидкостей / Вестник ВГТА. № 3, 1998. С.76–79.
2. Кишиневский М.Х. К экспериментальному изучению закономерностей турбулентного переноса в вязком подслое/ М.Х. Кишиневский, Т.С. Корниенко, В.П. Попович, В.А. Парменов // Теор. основы хим. технологии – Т. 4, № 3. 1970. С. 459–460.
3. Накоряков В.Е. и др Исследование турбулентных течений двухфазных сред / В.Е. Накоряков, А.П. Бурдуков, Б.Г. Покусаев и др. – Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1973, – 315 с.
4. Gordon S.L. The role of ionic migration in electrolytic mass transport; diffusivities of  $[\text{Fe}(\text{CH})_6]^{3-}$  and  $[\text{Fe}(\text{CH})_6]^{4-}$  in KOH and NaOH Solutions / S.L. Gordon, J.S. Newman, C.W. Tobias // Ber. Bunseng. Phys. Chem. – 1966. Bd. 70, № 4. – S. 414–420.
5. Кишиневский М.Х. Экспериментальное исследование массоотдачи от неподвижного диска к турбулентному потоку жидкости/ М.Х. Кишиневский, Т.С. Корниенко // Массообменные процессы химической технологии: – Сб. аннотаций. Вып. 3 – М.: Химия, 1968. С. 89.
6. Кишиневский М.Х. Определение коэффициентов трения на стенках аппарата с механическим перемешиванием при турбулентном режиме движения / М.Х. Кишиневский, Т.С. Корниенко, А.Н. Микелевич // Журн. прикл. химии, 1990. Т.63, № 6. С. 1417–1419.

#### REFERENCES

1. Kornienko T.S. Masso- i teplootdacha pri turbulentnom techenii viazkikh zhidkosti / Vestnik VGTA. № 3, 1998. С. 76–79.
2. Kishinevskii M.Kh. K eksperimental'nomu izucheniiu zakonomernosti turbulentnogo perenosa v viazkom podsloe/ M.Kh. Kishinevskii, T.S. Kornienko, V.P. Popovich, V.A. Parmenov // Teor. osnovy khim. tekhnologii – Т. 4, № 3. 1970. S. 459-460.
3. Nakoriakov V.E. i dr Issledovanie turbulentnykh techenii dvukhfaznykh sred / V.E. Nakoriakov, A.P. Burdukov, B.G. Pokusaev i dr. – Novosibirsk: ITF SO AN SSSR, 1973, – 315 s.
4. Gordon S.L. The role of ionic migration in electrolytic mass transport; diffusivities of  $[\text{Fe}(\text{CH})_6]^{3-}$  and  $[\text{Fe}(\text{CH})_6]^{4-}$  in KOH and NaOH Solutions/ S.L. Gordon, J.S. Newman, C.W. Tobias // Ber. Bunseng. Phys. Chem. – 1966. Bd. 70, № 4. – S. 414–420.
5. Kishinevskii M.Kh. Eksperimental'noe issledovanie massootdachi ot nepodvizhnogo diska k turbulentnomu potoku zhidkosti / M.Kh. Kishinevskii, T.S. Kornienko // Massoobmennye protsessy khimicheskoi tekhnologii: – Sb. annotatsii. Vyp. 3 – М.: Khimiia, 1968. S. 89.
6. Kishinevskii M.Kh. Opredelenie koefitsientov treniia na stenkakh apparata s mekhanicheskim peremeshivaniem pri turbulentnom rezhime dvizheniia / M.Kh. Kishinevskii, T.S. Kornienko, A.N. Mikelevich // Zhurn. prikl. khimii, 1990. Т. 63, № 6. S.1417–1419.

© Ульшин С.В., Казьмин И.А., 2017



«Воздушно-космические силы. Теория и практика». Материал поступил в редколлегию 18.05.2017 г.

Ульшин Сергей Валентинович, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru

Казьмин Игорь Александрович, полковник, начальник электрогазовой службы командования Военно-воздушных сил Главного командования Воздушно-космических сил, соискатель научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru