

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ПО МАКСИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ И ПЕРЕПАДУ ДАВЛЕНИЯ

Е.Ф. Авдеев, В.В. Большунова, А.В. Виноградов

Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск



Предлагается и обосновывается новый способ определения расхода при турбулентном течении в трубах по измеренным значениям максимальной скорости и перепаду давления. Получена одинаковая по структуре формула для расхода при использовании четырех различных классических распределений скорости. Дана ее геометрическая интерпретация. Уточнена связь между максимальной и средней скоростями, на основе которой экспериментально подтверждена возможность нахождения расхода только по измеренной максимальной скорости методом последовательных приближений.

ВВЕДЕНИЕ

Точное определение расходов при турбулентном течении в трубах до настоящего времени остается проблемой в связи с неоднозначностью связи между максимальной и средней расходной скоростями.

В гидравлически гладких каналах происходит значительное «расслоение» безразмерных профилей скорости с изменением числа Рейнольдса, а для неизменного числа Рейнольдса «расслоение» связано с изменением характера шероховатости [1]. Поэтому при разработке новых способов определения расходов предпочтительно использовать зависимости для распределения скоростей, справедливые как для гладких, так и для шероховатых каналов.

С технической стороны это должны быть устройства, вызывающие минимальные сопротивления в потоке, т.к. при больших объемных расходах сопротивление устройств требует значительных дополнительных мощностей насосов. Наконец, для практического использования нужны способы, требующие минимального числа измеряемых параметров.

Предлагаемый ниже новый способ определения расхода разработан с учетом оптимального выполнения названных требований.

ПОЛУЧЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАСХОДА И ЕЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Универсальные зависимости для распределения скоростей, справедливые для гладких и шероховатых каналов, включают в себя максимальную и динамическую скорости, поэтому будем исходить, прежде всего, из необходимости измерения максимальной скорости на оси трубы. Поскольку действительное распределение скоростей определяет напряжение трения на стенке τ_w , от которого, в свою оче-

редь, зависит динамическая скорость

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (1)$$

и перепад давления Δp на длине L

$$\tau_w = \frac{\Delta p}{L} \frac{a}{2} \quad (2)$$

(a – радиус трубы), возникает также необходимость в измерении перепада давления.

Из (1) и (2) следует связь динамической скорости и перепада давления

$$u_* = \sqrt{\frac{\Delta p a}{2 L \rho}}. \quad (3)$$

Таким образом, в отличие от существующих способов измерения расхода [2-4] повышение точности определения расхода может быть достигнуто за счет того, что действительный профиль скорости по сечению трубопровода может учитываться опосредованно через измерение максимальной скорости и перепада давления.

Вначале из логарифмического распределения скоростей, справедливого как для гладких, так и для шероховатых труб [1], находим локальное значение скорости u :

$$u = u_{\max} - 5.75 u_* \lg \frac{a}{a-r}, \quad (4)$$

где u_{\max} – максимальная скорость на оси трубопровода, r – текущий радиус.

Выражение для расхода получим в результате интегрирования выражения

$$Q = \int_0^a 2\pi r u dr \quad (5)$$

после подстановки в него зависимости (4) для скорости.

Получение интеграла осложняется при подстановке верхнего предела $r = a$ в полученную первообразную

$$Q = \lg a \left. \frac{r^2}{2} \right|_0^a - \frac{1}{\lg 10} \left(\frac{(a-r)^2}{2} \ln(a-r) - a(a-r) \ln(a-r) - \frac{(a-r)^2}{4} + a(a-r) \right) \Big|_0^a, \quad (6)$$

что преодолевалось следующим образом: в верхний предел подставлялась величина $r = a - \varepsilon$, где $\varepsilon \ll a$; на участке от $(a - \varepsilon) \leq r \leq a$ учитывался ламинарный подслон с линейным распределением скоростей. При сравнении значений расхода, полученных с учетом ламинарного подслоя, и значений расхода, где пренебрегали величинами ε и ε^2 как достаточно малыми, погрешность составила 0.01%. Неопределенности $\varepsilon \lg \varepsilon$ и $\varepsilon^2 \lg \varepsilon$, раскрытые по правилу Лопитала, при $\varepsilon \rightarrow 0$ приняты равными нулю.

В результате выражение для расхода принимаем в следующем виде:

$$Q = \pi a^2 (u_{\max} - 5.75 * 1.5 * \lg \varepsilon * u_*). \quad (7)$$

Перемножая все известные численные значения и подставляя выражение для динамической скорости (3) в (7), получаем

$$Q = \pi a^2 \left(u_{\max} - 2.6487 \sqrt{\frac{\Delta p a}{L \rho}} \right). \quad (8)$$

В другом случае выражение для расхода было найдено при использовании классического профиля Дарси в центральной части трубы (до $0.6a$)

$$\frac{u_{\max} - u}{u_*} = 5.08 \left(1 - \frac{y}{a} \right)^{3/2}, \quad y = a - r, \quad (9)$$

а ближе к стенке - логарифмической зависимости.

В этом случае получили выражение для расхода

$$Q = \pi a^2 \left(u_{\max} - \left(\frac{5.08 \cdot 4 \cdot 0.6^{7/2}}{7} + 5.75 \cdot (0.72 \cdot \lg e - 0.64 \cdot \lg 0.4) \right) \cdot u_* \right), \quad (10)$$

которое после преобразования принимает вид

$$Q = \pi a^2 \left(u_{\max} - 2.6503 \sqrt{\frac{\Delta p a}{L p}} \right), \quad (11)$$

практически не отличающийся от выражения (8).

Исходя из распределения скоростей по Карману

$$\frac{u_{\max} - u}{u_*} = -\frac{1}{\chi} \left[\ln \left(1 - \sqrt{\frac{r}{a}} \right) + \sqrt{\frac{r}{a}} \right], \quad (12)$$

где χ - универсальная постоянная турбулентности, была также найдена зависимость для расхода

$$Q = \pi a^2 \left(u_{\max} - 1.2833 \frac{u_*}{\chi} \right). \quad (13)$$

При $\chi = 0.4$ имеем

$$Q = \pi a^2 \left(u_{\max} - 2.2686 \sqrt{\frac{\Delta p a}{L p}} \right). \quad (14)$$

Известно, что наиболее точно непрерывное распределение скоростей в трубах описывается формулой Рейхардта [5]

$$\frac{u}{u_*} = 2.5 \ln \left(\frac{1.5(1 + 0.4y^+)(1 + R)}{1 + 2R^2} \right) + 7.8 \left[1 - e^{-\frac{y^+}{11}} - \frac{y^+}{11} e^{-0.33y^+} \right], \quad R = \frac{r}{a}, \quad y^+ = \frac{(a-r)u_*}{\nu}, \quad (15)$$

где ν - кинематическая вязкость.

После приведения (15) к виду $\frac{u_{\max} - u}{u_*}$ и последующего выражения локальной

скорости в результате интегрирования, по аналогии с предыдущими случаями, получено следующее выражение для расхода:

$$Q = \pi \left(u_{\max} a^2 - 2 \left[\frac{2.06a^2 u_* + 95.44va - 6.25v \left(\frac{1.25v}{u_*} + a \right) \ln \left(1 + \frac{0.4au_*}{v} \right) - \frac{948.86v^2}{u_*} + \left(\frac{943.8v^2}{u_*} - 3.9a^2 u_* \right) e^{-\frac{au_*}{11v}} + \left(6.51va + \frac{39.46v^2}{u_*} - \frac{0.35a^3 u_*^2}{v} \right) e^{-\frac{0.33au_*}{v}} \right] \right), \quad (16)$$

где u_* находится через перепад давления по формуле (3).

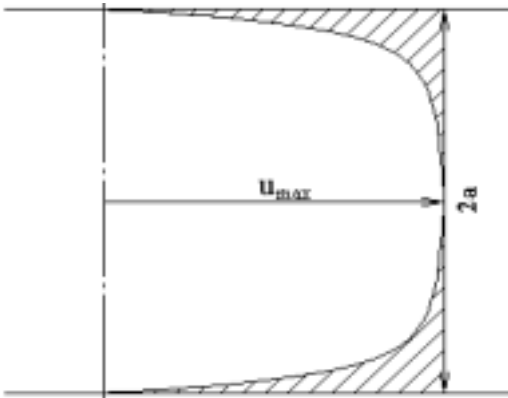


Рис.1. Геометрическая интерпретация формул для расхода

Полученным четырем формулам (8), (11), (14) и (16) можно дать одинаковую геометрическую интерпретацию (рис.1). Первое слагаемое $\pi a^2 u_{\max}$ представляет собой объем цилиндра радиуса a и длиной, равной u_{\max} , а вторые слагаемые, зависящие от перепада давления, - объем заштрихованной части, что геометрически доказывает связь действительного распределения скорости с перепадом давления (даже при одной и той же максимальной скорости).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА СПОСОБА

Устройство, реализующее способ, схематично изображено на рис.2.

По оси трубопровода Т установлена трубка Пито для определения максимальной скорости

$$u_{\max} = \sqrt{\frac{2(p_0 - p)}{\rho}}, \quad (17)$$

где p_0 - давление торможения на оси трубопровода, p - статическое давление в этом же сечении.

Перепад давления Δp на длине L измеряется на участке трубы, имеющем диаметр, одинаковый с диаметром сечения, где измеряется максимальная скорость.

Предложенный способ был апробирован с использованием данных, полученных при проведении ряда экспериментов на стенде «Циркуляционная петля» кафедры «Теплофизика» ИАТЭ. Расход воды в контуре определялся предложенным способом и с помощью выполненной по ГОСТ трубы Вентури. Результаты экспериментов показали, что расход, определяемый по максимальной скорости и перепаду давления, отличается от расхода, измеренного по трубе Вентури, в среднем не более, чем на 5%. Из полученных зависимостей (8), (11), (14) и (16) наиболее точными являются выражения (11) и (16).

Из выражения для расхода (11) можно получить связь между максимальной и средней скоростями при турбулентном течении. Достаточно подставить в левую и правую части (11) расход и перепад давления, выраженные через среднюю скорость, чтобы получить

$$u_{\max} = u_{\text{ср}} (1 + 1.32515 \sqrt{\lambda}), \quad (18)$$

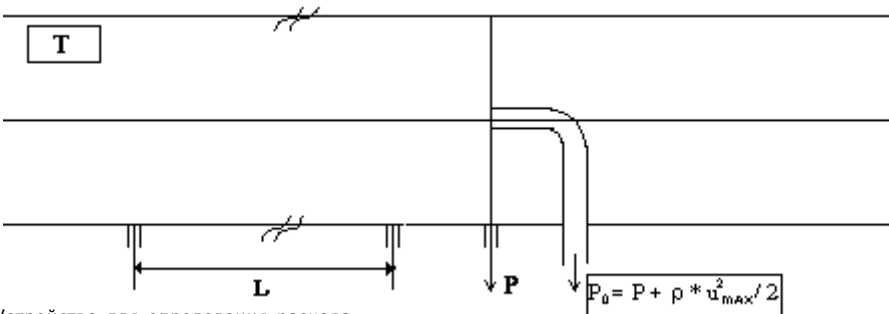


Рис.2. Устройство для определения расхода

где λ - коэффициент сопротивления трения;
отсюда

$$u_{\text{ср}} = \frac{u_{\text{max}}}{1 + 1.32515\sqrt{\lambda}}. \quad (19)$$

Формула (19) совпадает с аналогичным выражением, приведенным в справочнике [5], но с уточненным значением численного коэффициента при $\sqrt{\lambda}$.

Например, при $\lambda = 0.02$ формула (19) дает $\frac{u_{\text{max}}}{u_{\text{ср}}} = 1.1869$, что находится в пря-

мом соответствии с общепринятыми значениями отношения $\frac{u_{\text{max}}}{u_{\text{ср}}}$, уменьшающимися с ростом числа Re от 1.3 при ($Re \approx 5000$) до 1.15 при сравнительно больших числах Re ($Re \approx 3 \cdot 10^6$).

Из полученной зависимости (19) следуют дополнительные выводы.

1. Чтобы определить расход для гидравлически шероховатых каналов, достаточно измерить максимальную скорость при известной средней величине бугорка шероховатости k , т.к. коэффициент сопротивления трения λ в этом случае зависит только от относительной шероховатости k/a .

2. Для гидравлически гладких каналов расход также можно определить и без измерения перепада давления только по измеренному значению u_{max} , применив метод итераций. В нулевом приближении принимается некоторое значение λ (например, 0.02), с которым по формуле (19) рассчитывается средняя скорость в нулевом приближении, а по ней в нулевом приближении рассчитывается число Re^0 . По значению числа Re определяется λ , по формуле (19) – средняя скорость и число Re в первом приближении и т.д. до тех пор, пока значения средней скорости не совпадут с заданной степенью точности. По найденному значению средней скорости определяется расход.

Этот прием был применен к опытным данным, полученным для максимальной скорости в восьми экспериментах на стенде «Циркуляционная петля», и показал более чем хорошие результаты.

В табл. 1 приведены значения расходов, найденные по измеренным значениям максимальной скорости и перепаду давления по формуле (11) и только по измеренной максимальной скорости, когда средняя скорость находилась методом итераций по формуле (19). Видно, что отличие в расходах не превышает 2%, что на-

Таблица 1

	По формуле (11)				По формуле(19)			
	U_{max} , м/с	Δp , Па	Q , м ³ /с	$u_{\text{ср}}$, м/с	Re	λ	$U_{\text{ср}}$, м/с	Q , м ³ /с
1	1.665	1471.0	0.00284	1.444	63086.2	0.01996	1.402	0.00275
2	1.874	2206.5	0.00315	1.603	71164.6	0.01937	1.582	0.00311
3	2.284	2942.0	0.00387	1.972	87089.8	0.01842	1.936	0.00380
4	2.495	3922.7	0.00419	2.134	95285.1	0.01801	2.118	0.00416
5	2.815	5148.5	0.00472	2.402	107799.0	0.01738	2.396	0.00471
6	2.888	4413.0	0.00492	2.506	110650.0	0.01729	2.460	0.00483
7	3.141	5638.8	0.00532	2.709	120475.1	0.01701	2.678	0.00526
8	3.249	6129.2	0.00550	2.799	124695.4	0.01690	2.772	0.00544

ходится в пределах погрешности измерений, причем разница в расходах уменьшается с ростом числа Рейнольдса.

Литература

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974.
2. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества. – Л.: Машиностроение, 1989.
3. Авторское свидетельство СССР № 206850, кл. G 01F 1/37, 1967.
4. Авторское свидетельство СССР № 317902, кл. G 01F 1/37, 1971.
5. Кириллов П. Л., Юрьев Ю. С., Бобков В. П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – М.: Энергоатомиздат, 1990.

Поступила в редакцию 10.01.2000.

УДК 620.93

Experimental Research of Plasm-chemical Reactors Based on Frontal Ionization Waves \V.S. Kayokin, D.V. Meshalkin, V.K. Semyenov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 4 pages, 5 illustrations. – References, 4 titles.

Electric and thermal characteristics of discharge elements of plasm-chemical reactors based on frontal ionization waves, developed in the Ivanovo State Power University are investigated experimentally. The reactors can be utilised both for elimination of harmful-gaseous admixtures from exhaust gas mixtures, and for synthesis of ozone from free air.

УДК 532.526.4:621.039.533.34

Determination of Consumption Using Maximal Velocity and Pressure Overfall \E.F. Avdeev, V.V. Bol'shunova, A.V. Vinogradov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 6 pages, 2 illustrations, 1 table. – References, 5 titles.

A new method is suggested for determination of the consumption during turbulent flow in pipes. The method is based on measured values of the maximal velocity and pressure overfall of the flow. Using four different classical velocity distributions identical as to the structure, formula for the consumption was obtained and its geometrical interpretation is given. The relation of maximal and average velocities is defined more accurately and it is confirmed experimentally that the consumption can be determined using the method of successive approximations on the base of measured maximal velocity alone.

УДК 621.039.586 : 536.42

Model of Melten Fuel Relocation and Solidification in Undercore Channels During Fast Reactor Severe Accident \G.N. Vlasichev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 10 pages, 5 illustrations. – References, 11 titles.

The model is developed for the relocation and solidification of melted fuel in the pass of coolant channels of lower blanket under severe accident with the core meltdown. The model incorporates models of thermal conductivity and volumetric solidification and takes into account the narrowing of a channel and increase of relocating melt viscosity. The dynamics of changes both of the solidcrust thickness in a channel and the depth of channel material meltthrough is considered within the frames of the model. Numerical results consistent with experimental data is obtained as to the length of penetration of aluminium oxide melt into quartz pipes of different diameter in relation to the THEFIS experiment condictions.

УДК 621.039.59

Burning of Plutonium in System of VVER and BN reactors with Its Recycling \A.V. Petrov, S.G. Usynina, V.A. Chirkov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 5 pages, 5 illustrations, 1 table. – References, 6 titles.

Different schemes of plutonium circulation in VVER and BN reactors are considered in the paper. Variants of plutonium circulation and burning in the closed fuel cycle according to the separate scheme (reactor of each type utilizes only its own plutonium) and in the symbiotic VVER- BN system are investigated. It is shown that multiple usage of plutonium is the most effective in a system of reactors of different type. Presence of fast reactors in the system allows to improve utilization of plutonium in thermal reactors.

УДК 51-72:621.039.526

Failures of reactor runaway. The elementary models and regularities \N.M. Kadjuri; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 7 pages, 2 illustrations, 1 table. – References, 4 titles.

The temporal behaviour of the fast reactor power when introducing the reactivity with high rates (up to 50 β/c) is considered. It is shown that the energy release during an outburst is proportional