

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУЙНОГО ТЕЧЕНИЯ, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ МЕЖДУ ДВУМЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ СТЕНКАМИ

О. Н. Кашинский, Б. К. Козьменко, В. Е. Накоряков,
И. А. Павлов

(Новосибирск, Ленинград)

Течение жидкости в узком зазоре между двумя параллельными поверхностями является простейшей физической моделью процессов в пористых средах. Такого типа течения встречаются, например, в трещинах породных коллекторов для извлечения геотермальной энергии [1]. Простейшая модель течения такого типа — радиальное растекание жидкости от источника [2]. Однако в практических случаях осесимметричное радиальное течение является, как правило, чрезмерной идеализацией. В большинстве случаев наиболее вероятным будет несимметричное течение струйного типа между параллельными поверхностями. Наибольший интерес представляет начальный участок струи вблизи источника или стока, поскольку именно он определяет гидродинамическое сопротивление системы. Систематические исследования этой задачи в литературе отсутствуют.

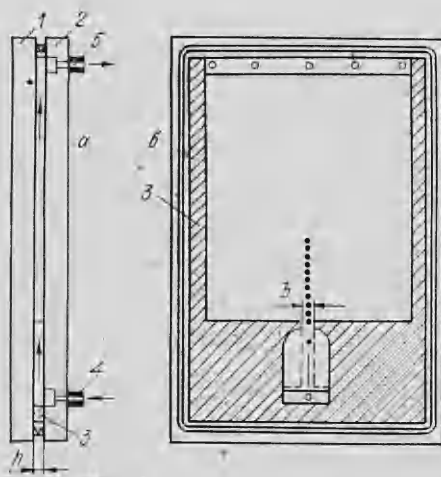
Цель данной работы — изучение общего характера течения в струе, распространяющейся в узком зазоре, и получение основных гидродинамических характеристик в турбулентном и переходном режимах течения.

Эксперименты проводились на установке, схематически представленной на фиг. 1. Две плоскопараллельные пластины 1, 2 из оргстекла толщиной 24 мм образовывали зазор, ширина которого могла меняться с помощью вставки 3. Вставка имела форму, представленную на фиг. 1, б, что обеспечивало истечение струи жидкости из сопла, зажатого между пластинами. Обвод сопла был выполнен по профилю Витошинского. Подвод и отвод жидкости производились через штуцера 4, 5, расположенные на верхнем и нижнем торцах пластин. В канавку пластины 2 укладывалась кольцевая резиновая прокладка, затем пластины равномерно стягивались между собой.

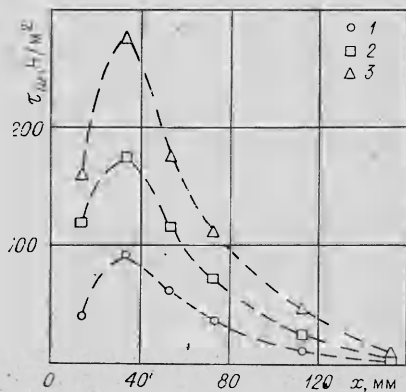
Для измерений в пластину 1 были заделаны по осевой линии 12 электрохимических датчиков трения [3] с электродами круглой формы диаметром 0,1 мм на расстоянии 20 мм друг от друга. Пластина с датчиками была притерта по плоскости, так что при измерениях не происходило возмущения потока. Сигналы датчиков усиливались многоканальным широкополосным усилителем постоянного тока. Регистрация выходных сигналов усилителей производилась интегрирующим и среднеквадратичным вольтметрами, в ряде режимов одновременно записывалось несколько сигналов на магнитофон типа МР 021 фирмы «Шлюмберже» (в режиме частотной модуляции).

Предварительно была проведена визуализация течения в различных режимах течения. Использовался метод, описанный в [4], с применением оптически-активной жидкости. Характерные картины течения приведены на фиг. 2. Числа Рейнольдса, определяемые как $Re = u2h/\nu$ (u — средняя скорость жидкости в сопле, ν — кинематическая вязкость), равны 1250 и 6000 (фиг. 2, а, б соответственно). В ламинарном режиме течения (фиг. 2, а) струя, вытекающая из сопла, характеризуется малым углом раскрытия. При возрастании скорости возникает начальная неустойчивость течения в виде колебаний струи на некотором расстоянии от входа. В турбулентном течении (фиг. 2, б) угол раскрытия струи резко возрастает.

Измерение распределения касательного напряжения на стенке τ_w по оси струи производилось при различных значениях ширины сопла b и расстояния между пластинами h . Характерные распределения τ_w в турбулентном режиме течения приведены на фиг. 3 для $h = 1,5$ мм, $b = 3,5$ мм, x — расстояние от среза сопла, отсчитываемое вдоль осевой линии, точки 1 — $Re = 9530$; 2 — 13620; 3 — 19050. Распределения $\tau_w(x)$ имеют ка-



Фиг. 1



Фиг. 3

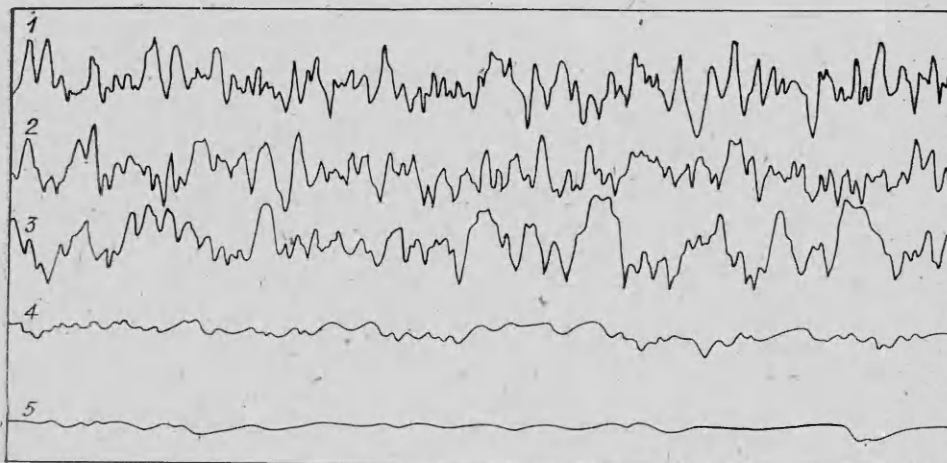


Фиг. 2

чественно одинаковый вид для различных значений b и h . При малых x происходит вначале резкое возрастание τ_w , связанное с турбулизацией струи, затем τ_w достигает максимума, после чего происходит достаточно быстрое его падение по длине. Расстояние, на которое распространяется турбулентная струя, растет с увеличением ширины струи и падает с уменьшением расстояния между пластинами, что вполне естественно, поскольку при увеличении b происходит возрастание начального импульса струи, а с сокращением расстояния между пластинами растет диссипация энергии за счет трения о стенки.

Характерные осциллограммы диффузионного тока датчиков в разных точках по длине струи приведены на фиг. 4, где $Re = 11600$, режим течения развитый, турбулентный. Координата x равна: 1 — 15; 2 — 35; 3 — 55; 4 — 75; 5 — 115 мм. С ростом x вначале имеет место возрастание интенсивности пульсаций трения, затем происходит их достаточно быстрое уменьшение, причем пульсации становятся более низкочастотными, и на некотором расстоянии от входа происходит реламинаризация режима, при которой запись сигнала датчика представляет собой прямую линию. Спектр сигналов в турбулентном режиме является сплошным и качественно подобен спектру турбулентных пульсаций в трубе.

При исследовании переходного режима течения предпринимались меры для исключения возможных периодических возмущений. Эксперименты проводились в вечернее время, все оборудование, расположенное в ближайших комнатах (двигатели, вентиляторы), за исключением измерительной аппаратуры, отключалось. Жидкость закачивалась насосом в верхний бак, затем двигатель насоса отключался, и во время эксперимен-



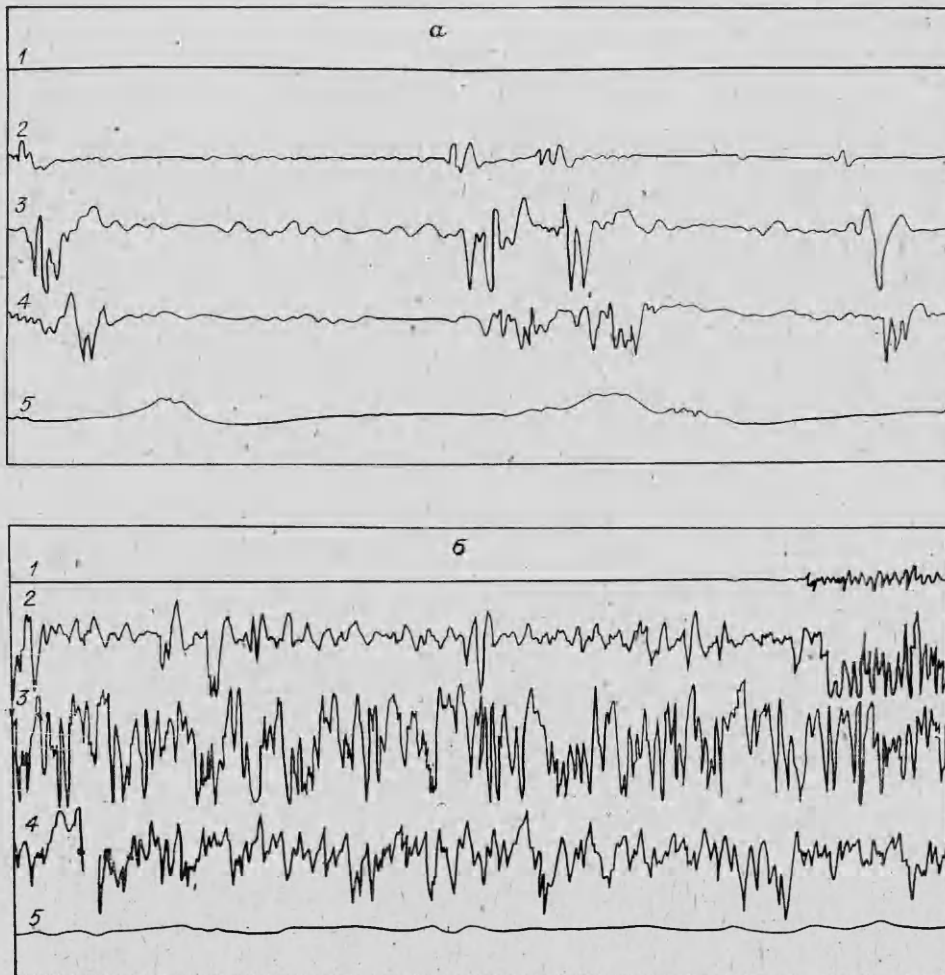
Ф и г. 4

та жидкость сливалась из верхнего бака через рабочий участок. Постоянство расхода поддерживалось вручную с помощью регулировочных вентилей, величина расхода измерялась ротаметром РС-3 или РС-5. Ручной регулировкой удавалось поддерживать расход жидкости постоянным с точностью $\pm 2\%$ (колебания расхода не превышали $\pm 1,5$ деления ротаметра).

Эксперименты были проведены в режиме «естественного» перехода, когда возникновение турбулентного течения определялось неконтролируемыми начальными возмущениями, неизбежно присутствующими в гидродинамической линии. В принципе на процесс перехода могли также влиять вибрации пола, вызываемые различными возможными источниками, поскольку их отсутствие контролировалось только вблизи экспериментальной установки. Осуществить развязку от этих вибраций было затруднительно, так как они могли передаваться не только через основание, на котором был установлен рабочий участок, но и через подводящие и отводящие трубки. Тем не менее нерегулярные возмущения не могли, видимо, внести заметного вклада в процесс перехода.

Характерные осциллограммы токов электрохимических датчиков, расположенных в разных сечениях по оси струи, в зависимости от времени приведены на фиг. 5, где $Re = 4760$, координата x равна: 1 — 15; 2 — 35; 3 — 55; 4 — 75; 5 — 115 мм. Во всех случаях электрохимический датчик, расположенный в сопле (на расстоянии $x = -5$ мм от среза), показывал отсутствие пульсаций даже при больших скоростях жидкости, так что процесс развивался непосредственно в струе. Параметром, определяющим начало перехода, является число Рейнольдса, построенное по удвоенной толщине зазора. При этом критическое число Рейнольдса, при котором имелись достаточно регулярные возмущения, было близко к соответствующим числам для течения в круглой трубе или плоском канале. В этом отношении исследуемое течение значительно отличается от свободной плоской струи, где неустойчивость возникает при значительно меньших числах Рейнольдса [5].

Как видно из фиг. 5, имеются две возможные картины развития возмущений. Для малых чисел Re , близких к критическому, характерно появление турбулентных «пробок» малой длительности (фиг. 5, а). Зарождение пробок происходит в струйном течении и не является следствием пульсаций расхода жидкости, так как, как правило, при $x = 15$ мм возмущений еще нет. С ростом числа Рейнольдса аналогично течению в трубе «пробки» становятся длиннее, имея тенденцию к смыканию. Для коротких пробок по приведенным осциллограммам легко определить скорость их перемещения по длине струи.



Ф и г. 5

Помимо «пробок», в течении существуют также возбужденные участки значительной продолжительности (при малых числах Рейнольдса от 3 до 10 с). Возбуждение существует одновременно во всех сечениях по x , является непрерывным во времени (в пределах времени существования) и более высокочастотным, нежели «пробки». В какой-то степени эти участки аналогичны развитию возмущений в свободной струе [6]. Характерный возбужденный участок приведен на фиг. 5, б.

Важно отметить, что характерным для исследуемого течения является существование в одном режиме (при одном числе Рейнольдса) участков невозмущенного течения, «пробок» и возбужденных участков (фиг. 5, а, б — это разные куски одного и того же режима при $Re = 4760$). Последовательность во времени может быть произвольная, однако чаще «пробки» появляются непосредственно перед возбужденными участками, а за последними обычно следует невозмущенное течение. С ростом числа Рейнольдса возбужденные участки возникают чаще, и в конце концов они смыкаются, образуя непрерывное во времени турбулентное течение до некоторого сечения по x , после которого происходит распад турбулентности.

Появление достаточно четко выраженных «пробок» и возбужденных участков более характерно для $h = 1$ мм. Для $h = 2$ мм имеется тенденция к более плавному поведению возмущений во времени, что ближе к картине течения в свободной струе. Затухание возмущений по длине струи зависит как от величин b и h (аналогично развитому турбулентному ре-

жиму), так и от вида возмущения. Как правило, «пробки» распространяются дальше по x , чем области возбужденного режима.

Значение координаты x , при котором происходит возникновение возбужденного режима, также не является фиксированным даже для одних и тех же b и h . Как видно из фиг. 5, возможны случаи, когда, например, при $x = 15$ мм возмущений практически нет, тогда как при $x = 35$ мм имеется непрерывное возмущение. В том же режиме течения в ряде моментов времени возбужденный режим имеет место также и при $x = 15$ мм. По всей видимости, точка возникновения возмущений перемещается некоторым случайным образом по продольной координате, причем вероятность того, что при данном x существует возбужденный режим, падает с уменьшением x , и при некоторых малых значениях x эта вероятность равна нулю для данного режима. К сожалению, более детально исследовать характер движения точки возникновения возмущений по x не удалось из-за большого расстояния между датчиками.

Были проведены также эксперименты, в которых течение в струе формировалось из развитого течения в прямоугольном канале сечением $1,5 \times 3,5$ мм, длиной 150 мм (геометрия обозначена штриховыми линиями на фиг. 1). Это позволило, во-первых, оценить влияние начальных условий на развитие течения в струе, во-вторых, сопоставить процессы перехода к турбулентному режиму в канале прямоугольного течения и в струе, имеющей свободные боковые границы. Записи процесса для этого случая сравнивались с записями для тех же значений расходной скорости жидкости при истечении струи из сопла такого же сечения. При наличии предвключенного участка первоначальная неустойчивость течения представляет собой непрерывное нерегулярное возмущение, характерные частоты которого значительно ниже, чем в течении без предвключенного участка. Возбужденные участки в данном случае не образуются. При увеличении числа Рейнольдса из первоначального возмущения начинают формироваться турбулентные «пробки», имеющие более высокие частоты. Эти «пробки» слабо выражены при $x = -25$ мм (сечение находится в прямоугольном канале), но в струйном участке течения интенсивно развиваются. Появление более высокочастотных возмущений происходит в струе, где скорость жидкости падает по длине, и эти возмущения проходят значительное расстояние по x .

В целом течение с предвключенным участком является более устойчивым, в особенности к высокочастотным возмущениям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дядькин Ю. Д., Парийский Ю. М. Извлечение и использование тепла Земли. Л.: ЛГИ, 1977.
2. Murphy H. D., Coxon M., McEligot D. M. Symmetric sink flow between parallel plates.— Trans. ASME. Ser. I. J. Fluids Engng, 1978, vol. 100.
3. Кутателадзе С. С., Бурдуков А. П., Накоряков В. Е., Кузьмин В. А. Применение электрохимического метода измерения трения в гидродинамике двухфазных сред.— В кн.: Теплообмен. Минск: Наука и техника, 1968, т. 2.
4. Бычков Ю. М. Визуализация тонких потоков несжимаемой жидкости. Кишинев: Штиинца, 1980.
5. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М.: Физматгиз, 1960.
6. Sato H. An experimental study of non-linear interaction of velocity fluctuations in the transition region of a two-dimensional wake.— J. Fluid Mech., 1970, vol. 44, pt 4.

Поступила 29/XII 1983 г.