

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ПОТОКА, ВЫЗЫВАЮЩИХ СДУВ И ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

А. Азизов, Б. Р. Тошов

(Ташкент)

В пневмотранспорте, а также при воздушной очистке различных поверхностей часто приходится перемещать, сдувать (смыть) различные твердые частицы зернистых материалов, почвы, песков, льдинок и других сыпучих материалов.

В реальных условиях твердые частицы на обтекаемой поверхности изменяют свое состояние в зависимости от скорости набегающего потока. К настоящему времени имеются многочисленные экспериментальные данные по определению критических скоростей, но не существует единой методики. Авторы по-разному фиксировали процесс сдува (смыва), в основном визуально наблюдая за состоянием частиц под действием потока [1].

Назовем критическими те значения скоростей невозмущенного потока вне пограничного слоя обтекаемой поверхности, под влиянием которых меняется состояние обтекаемых твердых частиц. Обозначим через u_1^* скорость, когда частицы находятся в предельно равновесном состоянии, т. е. могут совершать колебательно-поступательные движения на расстоянии не более своего диаметра без отрыва от поверхности, м/с; u_2^* , когда наблюдается отрыв (смыв) отдельных частиц, м/с; u_3^* , когда происходит массовый сдвиг (смыв) твердых частиц, т. е. начинается развитая эрозия. Соответствующие этим скоростям значения числа Рейнольдса по осредненным диаметрам частиц обозначим через $Re_1^* = u_1^* d / \nu$, $Re_2^* = u_2^* d / \nu$, $Re_3^* = u_3^* d / \nu$.

Имеющиеся методы определения этих критических скоростей недостаточно отражают изменение состояния твердых частиц под действием потока. Также мало изучена интенсивность уноса твердых частиц под влиянием данной (критической) скорости потока.

Здесь приводится полуэмпирический метод определения критических скоростей потока, под влиянием которых наступают указанные состояния различных твердых частиц определенного размера и плотности. Для этой цели проведены эксперименты на аэродинамических стендах Института механики и сейсмостойкости сооружений им. М. Т. Уразбаева АН УзССР. Аэродинамическая труба разомкнутого типа прямоугольного сечения размером рабочей части у выхода из сопла $0,2 \times 0,3$ м работала на нагнетание воздушного потока. Использование электрической схемы ГД (генератор — двигатель) позволило регулировать скорость набегающего потока от 0 до 40 м/с. Экспериментальная пластина с острыми кромками длиной 0,6 м устанавливалась на высоте 0,07 м от нижней стенки рабочей части, так что ветровой поток плавно обтекал поверхность пластины. На расстоянии 0,3 м от начала пластины сделан паз шириной 0,06 м и глубиной 0,006 м для установки кареток с образцами твердых частиц так, чтобы поверхность их находилась заподлицо с обтекаемой поверхностью пластины. Определена интенсивность уноса окатанных частиц лугово-сазовой супесчаной почвы с гранулометрическим составом от $1,4 \cdot 10^{-4}$ до $1,5 \cdot 10^{-3}$ м плотностью $\rho_s = 2720$ кг/м³ при скоростях воздушного потока от 3,0 до 12 м/с (интервалом 0,3 м/с). Гранулометрический анализ производился сухим просеиванием (по методу Саввинова), квадратичное отклонение размеров σ от среднего показано в табл. 1. Скорость ветрового потока определялась пневматическим способом над образцами за пограничным слоем обтекаемой пластины, а интенсивность сдува и уноса — весовым методом с использованием аналитических весов ВЛА-200г-М. Продолжительность времени продувки 120 с и выбрана из того расчета, что процесс сдува происходил в установившемся режиме.

На рис. 1 приведена зависимость безразмерных значений твердого расхода $\phi = 10^8 q / (\rho_s \sqrt{\rho^* g d})$ от $Re = ud / \nu$ для различных скоростей потока и среднего диаметра $d = 1,95 \cdot 10^{-4}$; $2,82 \cdot 10^{-4}$; $4,07 \cdot 10^{-4}$; $5,65 \cdot 10^{-4}$ и $1,25 \cdot 10^{-3}$ м (точки 4—8). Здесь q — массовый расход частиц в единицу времени с единиц поверхности, кг/(м²·с); $\rho^* = (\rho_s - \rho) / \rho$ — отношение

Таблица 1

i	10 ⁴ d, м	10 ⁶ σ, м	a _{ji}	b _{ji}	a _{ji}	b _{ji}	a _{ji}	b _{ji}
			j					
			1		2		3	
1	1,95	±5,5	0,87	-1,4295	12,2	-20,96	436	-806,04
2	2,82	±3,2	0,87	-1,5575	12,2	-23,15	436	-890,52
3	4,07	±9,2	0,87	-1,7540	12,2	-26,19	436	-987,22
4	5,65	±6,5	0,87	-1,9375	12,2	-28,38	436	-1068,92
5	12,5	±250	0,87	-2,3305	12,2	-33,6	436	-1263,34

силы веса твердой частицы (за вычетом архимедовой силы) к архимедовой силе. Комплекс ρ^* характеризует поведение инородных частиц в жидкой среде [2], при $\rho_s < \rho$ частица всплывает в потоке, при $\rho_s > \rho$ осаждается (тонет). Следовательно, в рассматриваемом случае $(\rho_s - \rho)/\rho > 0$; $\sqrt{\rho^*gd} = u_0$ — масштаб скорости пропорциональной гидравлической крупности (скорости падения) [1] частиц $\omega_0 = (1/C_d)\sqrt{2\rho^*gdK_2/K_1}$; $\rho_s u_0$ — характерное значение твердого расхода; g — ускорение силы тяжести, м/с²; ν — коэффициент кинематической вязкости несущего потока, м²/с; u — скорость невозмущенного потока, м/с; ρ, ρ_s — плотность потока и твердой частицы, кг/м³; C_d — коэффициент гидравлического сопротивления; K_1, K_2 — коэффициенты формы частиц (для шара $K_1 = \pi/4, K_2 = \pi/6$).

Как видно из рис. 1, в, для частиц определенного среднего диаметра и плотности зависимость $\varphi = f(\lg Re)$ описывается пересекающимися линиями 1—3, т. е. тремя режимами:

1) начальный (прямая 1 на рис. 1, б, увеличенная по ординате на два порядка) соответствует такому состоянию частиц, когда под действием потока отдельные частицы теряют устойчивость и могут перекачиваться без отрыва (сдува) с поверхности.

2) переходный (прямая 2 на рис. 1, а, увеличенная по ординате на порядок) соответствует такому состоянию частиц, когда происходит перекачивание, сдув, унос отдельных частиц под воздействием потока.

3) стабилизированный (прямая 3 на рис. 1, в) соответствует состоянию массового сдува частиц, т. е. развитой эрозии.

Таким образом, при различных скоростях потока для данного диаметра рас-

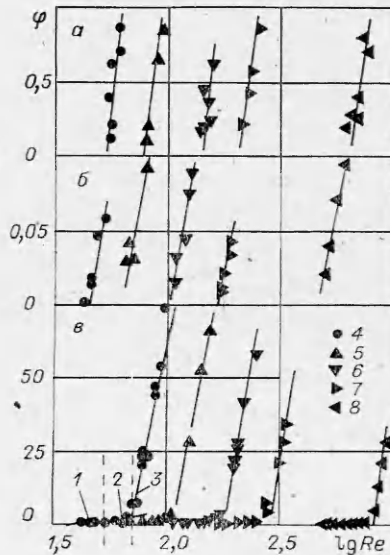


Рис. 1

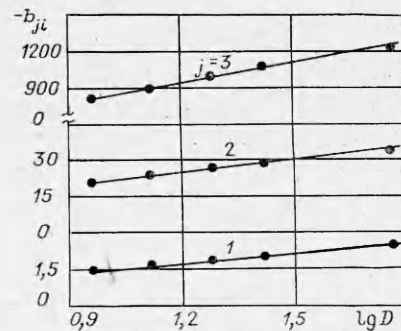


Рис. 2

смаатриваемых частиц характер изменения φ в зависимости от Re описывается тремя закономерностями.

Из рис. 1 легко получить значение безразмерного твердого расхода для каждого режима в отдельности:

$$(1) \quad \varphi_{ji} = a_{ji} \lg Re + b_{ji}.$$

Здесь j характеризует изменение φ в зависимости от режима и соответственно принимает значения 1, 2 или 3; i показывает изменение φ в зависимости от среднего диаметра d .

Для рассматриваемых значений скорости потока и осредненного гранулометрического состава образцов изменение экспериментальных постоянных a_{ji} и b_{ji} в указанных режимах ($j = 1, 2, 3$) приведено в табл. 1, откуда видно, что значения a_{ji} слабо зависят от гранулометрического состава частиц и изменяются при переходе от одного режима в другой, т. е. характеризуют количественное изменение твердого расхода в зависимости от скорости потока, а значения b_{ji} сильно зависят как от режима, так и от размера частиц: Если построить зависимость b_{ji} от логарифма безразмерного диаметра D (рис. 2), легко получить аналитические выражения, описывающие зависимость b_{ji} от $\lg D$ в рассматриваемых режимах течения для любого среднего диаметра:

$$(2) \quad -b_{1i} = 1,134 \lg D + 0,34;$$

$$(3) \quad -b_{2i} = 15,90 \lg D + 5,86;$$

$$(4) \quad -b_{3i} = 568 \lg D + 263$$

($D = (\rho^* g / \nu^2)^{1/3} d = Ar^{1/3}$ — число Архимеда). Подставляя в уравнение (1) соответствующие значения a_{ji} из табл. 1 и b_{ji} из соотношений (2)–(4), находим выражения для определения φ :

$$(5) \quad \varphi_1 = 0,87(\lg Re - 1,303 \lg D) - 0,34;$$

$$(6) \quad \varphi_2 = 12,20(\lg Re - 1,303 \lg D) - 5,86;$$

$$(7) \quad \varphi_3 = 436(\lg Re - 1,303 \lg D) - 263.$$

Обозначая $\lg \psi = \lg Re - 1,303 \lg D = \lg (Re/D^{1,303})$, получим обобщенное выражение для φ :

$$(8) \quad \varphi_j = A_j \lg \psi + B_j,$$

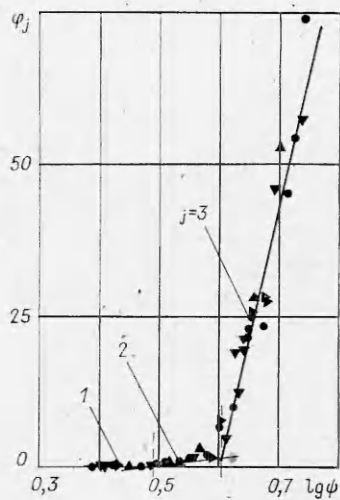
где ψ имеет смысл коэффициента подвижности [1].

Коэффициент подвижности, используемый в гидродинамике русловых потоков, можно преобразовать к виду $u/u_0 = u/\sqrt{\rho^* g d} = (ud/\nu)/(\nu\sqrt{\rho^* g d^3}) = Re/D^{1,5}$. Значит, $\psi = Re/D^{1,303}$ и соответствует u/u_0 .

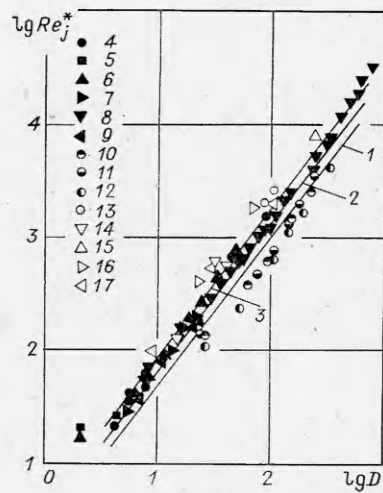
На рис. 3 линией показано изменение φ в зависимости от ψ (8), точками (значения их см. на рис. 1) нанесены опытные данные для твердых частиц различного среднего диаметра. Видно, что независимо от значения среднего диаметра частиц d изменение $\varphi_j = f(\psi)$ описывается одной ломаной кривой, а изменение характера развития наблюдается при переходе от одного режима к другому. В табл. 2 приведено изменение коэффициентов уравнения (8) и их статистические оценки (коэффициент парной линейной корреляции r , среднеквадратичное отклонение σ_ψ и σ_φ , а также осредненные значения $\langle \varphi \rangle$ и $\langle \psi \rangle$ для n -го количества опытов) для

Таблица 2

j	n_j	A_j	B_j	r_j	$\sigma_{\varphi j}$	$\sigma_{\psi j}$	$\langle \varphi_j \rangle$	$\langle \psi_j \rangle$	ψ_j^*	Ψ_j
1	19	0,87	-0,34	0,90	0,029	0,030	0,034	0,430	2,460	2,460—3,070
2	24	12,2	-5,86	0,88	0,360	0,026	0,546	0,526	3,070	3,070—4,043
3	28	436	-263	0,93	21,100	0,045	24,70	0,660	4,043	$\geq 4,043$



Р и с. 3



Р и с. 4

каждого режима, полученные с использованием метода наименьшего квадрата [3].

Таким образом, кривая $\varphi_j = f(\psi)$ в целом (рис. 3) при некоторых значениях ψ претерпевает изломы, которые соответствуют началу следующего режима. Отсюда можно найти критические значения $\psi = \psi_j^*$, отвечающие началу каждого режима.

Так, при $\psi = \psi_1^*$ частицы находятся в предельно равновесном состоянии, т. е. на пороге начального режима. Значение ψ_1^* найдем из соотношения $\varphi_1 = 0$ или $0,87 \lg \psi_1^* - 0,34 = 0$. Отсюда

$$(9) \quad \begin{aligned} \psi_1^* &= 2,46 \text{ или} \\ \text{Re}_1^* &= 2,46 D^{1,303}. \end{aligned}$$

В начале переходного режима, т. е. при $\psi = \psi_2^*$, происходит отрыв отдельных частиц от обтекаемой поверхности. Критическое значение ψ_2^* на пороге переходного режима определяется из условия $\varphi_1 = \varphi_2$, т. е. $0,87 \lg \psi_2^* - 0,34 = 12,20 \lg \psi_2^* - 5,86$. Отсюда

$$(10) \quad \begin{aligned} \psi_2^* &= 3,07 \text{ или} \\ \text{Re}_2^* &= 3,07 D^{1,303}. \end{aligned}$$

При $\psi = \psi_3^*$ частицы почвы находятся на грани массового сдува, т. е. в начале стабилизированного режима или развитой эрозии. Критическое значение ψ_3^* , т. е. соответствующая точка смены от переходного режима к стабилизированному, находится из условия $\varphi_2 = \varphi_3$ или $12,2 \lg \psi_3^* - 5,86 = 436 \lg \psi_3^* - 263$. Отсюда

$$(11) \quad \begin{aligned} \psi_3^* &= 4,043 \text{ или} \\ \text{Re}_3^* &= 4,043 D^{1,303}. \end{aligned}$$

На рис. 4 линии 1—3 показывают изменение Re_1^* , Re_2^* , Re_3^* от D согласно (9)—(11). Здесь же точками 4 приведены данные по ветровой эрозии сухого песка ($d = 5 \cdot 10^{-5} - 2,1 \cdot 10^{-3}$ м, $\rho_s = 2650$ кг/м³, $\rho = 1,21$ кг/м³) [4]; 5, 6 — песка и почвы ($d = 5 \cdot 10^{-5} - 1,75 \cdot 10^{-3}$ м, $\rho_s = 2650$ кг/м³, $\rho = 1,21$ кг/м³) [5]; 7 — песка ($\rho_s = 2650$ кг/м³, $\rho = 1,21$ кг/м³) [6]; 8 —

по водной эрозии кварцевых частиц ($d = 3,4 \cdot 10^{-4} - 3,0 \cdot 10^{-2}$ м, $\rho_s = 2650$ кг/м³, $\rho = 997,3$ кг/м³) [7]; 9 — метелей льда ($d = 2 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 10^{-4}$ м, $\rho_s = 920$ кг/м³, $\rho = 1,39$ кг/м³) [8]; 10—12 — сдува твердых тел ($d = 6,1 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 10^{-3}$ м) соответственно различного удельного веса ($\gamma = 9613; 14715; 26874$ Н/м³) [9]; 13 — данные по числам Рейнольдса, отвечающие граничным осредненным скоростям при пневмотранспорте очищенных семян пшеницы ($d = 2,59 \cdot 10^{-3}, 3 \cdot 10^{-3}$ м, $\rho_s = 1320$ кг/м³), 14 — песка ($d = 3,42 \cdot 10^{-4}, 7,15 \cdot 10^{-4}, 9 \cdot 10^{-4}$ м, $\rho_s = 2650$ кг/м³), 15 — гороха ($d = 5,76 \cdot 10^{-3}$ м, $\rho_s = 2270$ кг/м³), 16 — угля ($d = 6,25 \cdot 10^{-4}, 1,275 \cdot 10^{-3}$ м, $\rho_s = 1500$ кг/м³) [10]; 17 — для размывающих скоростей связанных грунтов ($d = 3,7 \cdot 10^{-4}, 1,5 \cdot 10^{-3}, 4 \cdot 10^{-3}$ м, $\rho_s = 2650$ кг/м³, $\rho = 997,3$ кг/м³) [11]. Эти данные приведены к условиям нашего эксперимента с учетом изменения плотности потока и сдуваемых материалов. Как видно из рис. 4, экспериментальные результаты многих авторов, полученные в разных условиях и средах для различного материала твердых частиц и потока, довольно хорошо согласуются с нашими и описываются критериальными уравнениями (9)—(11).

Количественное совпадение результатов опытов многих авторов позволяет считать, что выражения (9)—(11) могут быть использованы для определения критических скоростей потока, под влиянием которых частица находится в том или ином состоянии.

Для теоретического исследования особый интерес представляет количество уноса при скоростях потока, равных критическим $u = u_j^*$. На рис. 5 представлено изменение φ при скоростях потока, соответствующих пороговым значениям в различных режимах переноса. При критических скоростях потока уравнения (8), описывающие изменение φ_j в зависимости от ψ в различных режимах переноса, принимают вид

$$(12) \quad \varphi_1^* = 0, \quad q_1^* = 0;$$

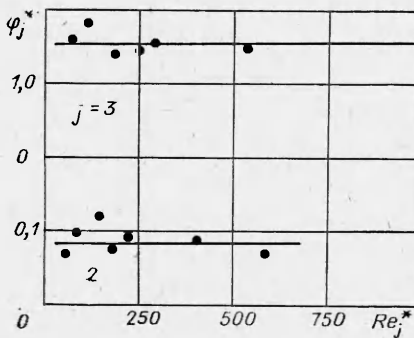
$$(13) \quad \varphi_2^* = 0,084, \quad q_2^* = 0,084 \cdot 10^{-8} \rho_s \sqrt{\rho^* g d};$$

$$(14) \quad \varphi_3^* = 1,542, \quad q_3^* = 1,542 \cdot 10^{-8} \rho_s \sqrt{\rho^* g d}.$$

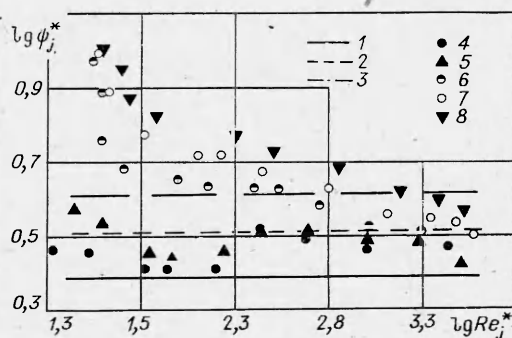
Как видно из рис. 5 и выражений (12)—(14), значение φ_j при критических скоростях независимо от среднего диаметра остается постоянным. Это положение может быть использовано как граничное условие при теоретическом исследовании в области перемещения твердых частиц с гладкой поверхности различными потоками.

Из табл. 2 видно, что при изменении ψ от 2,46 до 3,07 имеет место начальный режим (перекатывание частиц), в переходном режиме (перекатывание и отрыв частиц) ψ изменяется от 3,07 до 4,043, а в режиме массового отрыва частиц (стабилизированном) $\psi \geq 4,043$.

На рис. 6 показано изменение критического значения ψ_j^* в зависимости от Re_j^* , линии 1—3 соответствуют числам, при которых наступают начальный, переходный и стабилизированный режимы для различных раз-



Р и с . 5



Р и с . 6

меров частиц на гладкой поверхности. Для частиц диаметром $d > 1 \cdot 10^{-4}$ м ($Re_1^* = 18,12$, $Re_2^* = 22,62$, $Re_3^* = 29,8$) ψ не зависит от вязкости потока. Точками 4—8 приведены результаты опытов [12] по сдвух твердых частиц различного размера с поверхностями с равномерно распределенной песчаной шероховатостью (высота элементов $K = 1 \cdot 10^{-5}$, $1 \cdot 10^{-3}$, $2 \cdot 10^{-3}$, $3 \cdot 10^{-3}$ и $4 \cdot 10^{-3}$ м соответственно). Как видно из рис. 6, данные для $K = 1 \cdot 10^{-5}$ и $K = 1 \cdot 10^{-3}$ м согласуются с нашими. Это связано с тем, что высота $K \leq 1 \cdot 10^{-3}$ м слабо влияет на подвижность твердых частиц. Начиная с $K = 2 \cdot 10^{-3}$ м и выше, влияние шероховатости существенно при $\lg Re_j^* < 2,0$. Возможно, этим и объясняется расхождение результатов А. Шильдса, В. С. Кнороза и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков.— Л.: Гидрометеоздат, 1979.
2. Михалев М. А. О критериальных условиях начала трогания частиц несвязных зернистых грунтов, расположенных в потоке жидкости на дне и на береговом откосе.— В кн.: Известия Всесоюз. науч.-иссл. ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. Л.: Энергия, 1978, т. 126.
3. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул.— М.: Высш. шк., 1982.
4. Соколов Н. А. Дюны, их образование, развитие и внутреннее строение. Спб., 1884.
5. Shepil W. S. Transport of soil and snow by wind.— Met. Monographs, 1965, v. 6.
6. Бютнер Э. К. Динамика приповерхностного слоя воздуха.— Л.: Гидрометеоздат, 1978.
7. Гончаров В. Н. Движение наносов.— Л.— М.: Госстройиздат, 1938.
8. Дюнин А. К. Механика метелей.— Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
9. Ханалиев А. К вопросу об экспериментальном определении скорости трогания твердых частиц произвольной формы в зависимости от их удельного веса и диаметра.— В кн.: Аэродинамика смесей. Ташкент: Фан, 1983.
10. Welschof G. Pneumatische Förderung bei grossen Fördergutkonzentrationen.— Düsseldorf: Vdi-Verlag GMBH, 1962. Рус. пер. Вельшоф Г. Пневматический транспорт при высокой концентрации перемещаемого материала.— М.: Колос, 1964.
11. Мирзхулава Ц. Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости.— М.: Колос, 1967.
12. Азизов А., Джураев Т. Д., Кадыров Х. Г. Исследование влияния интенсивности турбулентности и шероховатости обтекаемой поверхности на возникновение дефляции.— В кн.: Материалы Всесоюз. конф. по механике сплошной среды: Механика сплошной среды. Ташкент: Фан, 1982.

Поступила 23/VIII 1985 г.

УДК 532.526.2

ОБЩАЯ СХЕМА РЕЖИМОВ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ТЕЧЕНИЙ

В. В. Боголепов

(Москва)

Различные локальные особенности на поверхности тела: разрывы или резкие изменения краевых условий, отрыв или присоединение потока, неровности и др.— могут оказывать значительное влияние на местные и глобальные характеристики его обтекания [1]. Это обстоятельство инициирует постоянный интерес к течениям в локальных областях, которые кроме большой практической значимости часто обладают еще немалой теоретической новизной (см., например, [2—6], где выполнены систематические исследования плоских локальных областей течения).

Однако большинство локальных областей пространственные, и если в изучении плоских областей достигнуты значительные успехи, то для пространственных областей получены лишь отдельные решения часто при использовании значительных упрощений [7—19]. Кроме того, из-за отсутствия систематических исследований трудно определить границы существования различных режимов течений в локальных пространственных областях и предельные переходы, которые позволяют перейти от одного режима обтекания к другому.

В работе выполнены систематические исследования режимов течения в локальных пространственных областях, для каждого из них сформулированы краевые задачи, изучены основные свойства их решений, построена общая классификационная схема режимов течений.