

ЛИТЕРАТУРА

1. Ван-Дайк М. Методы возмущений в механике жидкости.— М.: Мир, 1967.
2. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Методы теории функций комплексного переменного.— М.: Наука, 1973.
3. Pidsley P. H. A numerical study of long rod impact into a large target // J. Mech. Phys. Solids.— 1984.— V. 32, N 4.
4. Hangstad B. S., Dulum O. S. Finite compressibility in shaped charge jet and long rod penetration — the effect of shocks // J. Appl. Phys.— 1981.— V. 52, N 8.

г. Новосибирск

Поступила 28/1 1988 г.,
в окончательном варианте —
15/III 1988 г.

УДК 532.546

О. Б. Бочаров, О. В. Витовский, Ю. П. Колмогоров,
В. В. Кузнецов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЯЗКОСТНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Вязкостная неустойчивость фронта вытеснения в пористой среде возникает при вытеснении жидкости с повышенной вязкостью менее вязкой жидкостью или газом. Изучению формирования и развития образующихся при этом языков вытесняющей жидкости посвящено большое число как теоретических, так и экспериментальных работ (см. обзоры [1, 2]). Условие устойчивости вытеснения для нейтрально смачиваемых пористых сред впервые получено в [3]. Течение жидкостей в этом случае происходит в разных областях (поршневое вытеснение), капиллярные силы учитываются в граничных условиях на фронте вытеснения. Для поршневого вытеснения нелинейная стадия развития вязкостной неустойчивости экспериментально и теоретически исследована в ячейке Хил—Шоу [4].

При хорошем смачивании пористой среды одной из жидкостей совместное течение двух жидкостей в поровом пространстве происходит во всей области вытеснения [5]. Условие устойчивости фронта вытеснения по отношению к малым возмущениям с учетом двухфазности течения приведено в [6]. В [7] показано, что при неустойчивом вытеснении капиллярные силы, вызывающие перегородки жидкостей в областях больших градиентов насыщенности вытесняющей жидкости, стабилизируют длину языков. Вместе с тем экспериментальные данные по структуре и динамике роста языков вытесняющей жидкости в пористой среде при развитом двухфазном течении в настоящее время отсутствуют.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального изучения особенностей развития языков вытесняющей жидкости при неустойчивом вытеснении в условиях развитого двухфазного течения в области вытеснения. Проведено прямое сравнение полученных опытных данных по структуре и динамике роста языков с результатами численных расчетов на основе модели Маскета — Леверетта.

Эксперименты проводились на прямоугольной модели пористой среды с размером рабочего участка $1 \times 20 \times 60$ см, расположенной горизонтально. Рабочий участок заполнялся кварцевым песком, который затем виброуплотнялся при полном насыщении порового пространства водой. Это позволило получить однородную пористую среду с проницаемостью ~ 10 мкм² и пористостью $m = 0,4$. После виброуплотнения пористая среда высушивалась, вакуумировалась и насыщалась водным раствором NaCl с концентрацией 1 г/л, что позволило поддерживать однородную смачиваемость пористой среды водой в процессе опытов. Затем образец пористой среды заполнялся жидкостью с повышенной вязкостью от 1,2 до 80 мПа·с. Проведено два типа экспериментов. В первом вытесняющая жидкость хорошо смачивала пористую среду. В качестве вытесняющей жидкости использовался водный раствор NaCl с концентрацией 1 г/л, а вытесняемой — углеводородные жидкости с различной вязкостью. При заполнении рабочего участка углеводородной жидкостью перед опытом часть воды оставалась заземленной капиллярными силами, что моделировало начальную насыщенность вытесняющей жидкости, характерную, например, для нефтяных пластов в природных условиях. Во втором типе экспериментов вытесняющая жидкость не смачивала пористую среду. В качестве вытесняющей жидкости применялся очищенный керосин с

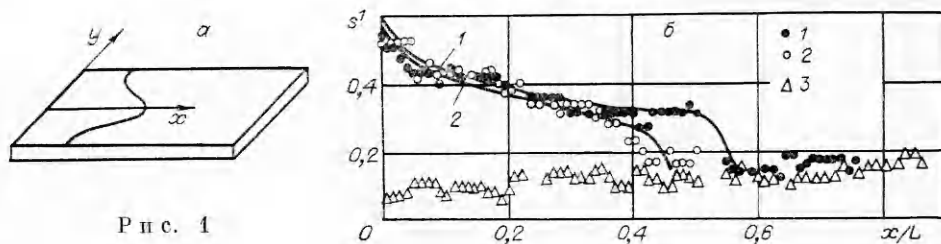


Рис. 1

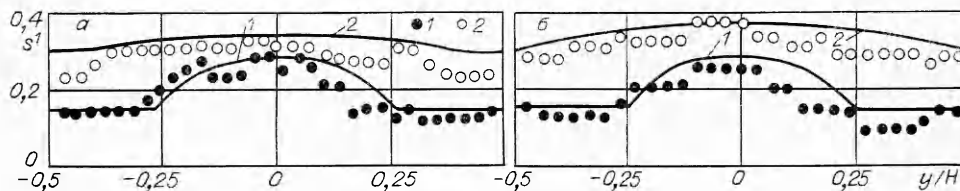


Рис. 2

$\mu = 1,2$ мПа·с, вытесняемой — водоглицериновые растворы с $\mu = 4—20$ мПа·с. Для моделирования начальной насыщенности вытесняющей жидкости водный раствор NaCl, первоначально заполняющий пористую среду, вытеснялся керосином, который затем вытеснялся перед опытом водоглицериновым раствором. Это позволило сохранить преимущественную смачиваемость пористой среды водоглицериновым раствором, который использовался как вытесняемая жидкость с повышенной вязкостью.

Все опыты проводились при постоянном расходе вытесняющей жидкости, подаваемой во входную камеру рабочего участка. В ней происходило выравнивание поля давления на входе в пористую среду. При малых скоростях вытеснения в устойчивом режиме были определены фазовые проницаемости для указанных типов экспериментов. Кривые капиллярного давления измерены методом полунепроницаемой перегородки.

При малой толщине рабочего участка (1 см) по сравнению с его шириной (20 см) процесс вытеснения близок к двумерному. Поле насыщенности вытесняющей жидкости измерялось методом гамма-индикаторов. В водную фазу вводилось радиоактивное вещество — промеран, содержащий изотоп ртути. Пространственное распределение гамма-излучения в процессе опытов измерялось гамма-камерой SEGAMS (ВНР), измерительным элементом которой является сцинтилляционный кристалл NaI с диаметром 0,3 м. Применение стандартного коллиматора высокого разрешения позволило получить разрешающую способность измерительной системы 5×5 мм по площади и 14 % по энергии. При обработке изображения на ЭВМ учитывалась неоднородность чувствительности ФЭУ детектора и статистический характер гамма-излучения.

На рис. 1, 2 приведены профили насыщенности вытесняющей жидкости s^1 соответственно в продольном и поперечном сечениях образца пористой среды в условиях неустойчивого вытеснения с формированием языка вытесняющей жидкости. Вытесняющая жидкость не смачивает пористую среду. Профили насыщенности s^1 получены при скорости фильтрации вытесняющей жидкости на входе $v_0 = 3,33 \cdot 10^{-5}$ м/с, абсолютная проницаемость пористой среды $k = 12$ мкм², пористость $m = 0,41$, межфазное натяжение $\sigma = 30$ мН/м, краевой угол натекания вытесняющей жидкости на гладкой кварцевой пластине 180° , оттекания 160° , вязкость вытесняемой жидкости $\mu_2 = 20$ мПа·с, отношение вязкостей вытесняющей и вытесняемой жидкостей $\mu_0 = \mu_1/\mu_2 = 0,059$. Продольные профили насыщенности (рис. 1, б) получены в момент времени $\tau = 0,5$ (безразмерное время определено как $\tau = tv_0/mH$, t — время, H — ширина модели) в центральном продольном сечении $y/H = 0$ — точки 1, в боковом продольном сечении $y/H = 0,4$ — точки 2, точки 3 соответствуют начальной насыщенности вытесняющей жидкости s_0^1 до начала вытеснения в сечении

$y/H = 0$ и практически совпадают с ней в сечении $y/H = 0,4$. Система координат показана на рис. 1, а.

Важная особенность процесса вытеснения в пористой среде — это то, что в отличие от ячейки Хил — Шоу вытеснение не является поршневым. Фронту вытеснения на рис. 1, б отвечает область резкого изменения насыщенности в головной и более плавного в хвостовой частях растущего языка (точки 1 и 2). За фронтом вытеснения происходит совместное течение двух жидкостей с постепенным увеличением насыщенности вытесняющей жидкости. Как и следует из анализа решений задачи вытеснения по модели Маскета — Леверетта, фронт вытеснения имеет конечную длину, определяемую капиллярными перетоками жидкостей в областях больших градиентов насыщенности [5]. При малых значениях параметра $\varepsilon = \sigma \sqrt{km}/(v_0 \mu_2 L)$ (L — длина модели) насыщенность вытесняющей жидкости на фронте вытеснения может быть оценена из решения задачи Баклея — Леверетта, т. е. без учета капиллярных сил [5]. Для фазовых проницаемостей, соответствующих вытеснению рис. 1, б, фронтальная насыщенность в решении Баклея — Леверетта $s_c^1 = 0,31$, что близко к значению насыщенности, наблюдаемому в опытах в области малых градиентов насыщенности за фронтом вытеснения в головной части растущего языка. Отношение подвижностей двухфазного фильтрационного потока за фронтом вытеснения и перед ним для опытных данных рис. 1, 2 равно 1,6, и, согласно критерию [7], вытеснение может быть неустойчивым.

Опережающее развитие фронта вытеснения в сечении $y/H = 0$ по сравнению с сечением $y/H = 0,4$ свидетельствует о деформации фронта вытеснения и образовании языка вытесняющей жидкости. Профили насыщенности вытесняющей жидкости в поперечном сечении образца пористой среды $x/L = 0,3$ (см. рис. 2, а) при $\tau = 0,295$ и $0,5$ (точки 1, 2) и анализ полученных на гамма-камере изолиний постоянной насыщенности вытесняющей жидкости (изосат) показывают, что в процессе вытеснения происходит преимущественное развитие возмущений фронта вытеснения с длиной волны, равной ширине модели (см. рис. 1, а). При этом образующийся язык с шириной, близкой к половине ширины образца, имеет не гладкую форму и содержит возмущения фронта вытеснения с меньшими длинами волн (см. рис. 2, а, $\tau = 0,295$). Проведенные опыты показали, что наибольшая деформация изосат наблюдается для насыщенностей, близких к фронтальной в головной части языка ($s^1 \approx 0,3$). Для больших насыщенностей, что соответствует большим расстояниям от фронта вытеснения, деформация изосат уменьшается и для $s^1 > 0,4$ выражена слабо (см. рис. 2, а, $\tau = 0,5$).

В проведенных экспериментах расход вытесняющей жидкости однороден по сечению рабочего участка. Малые возмущения фронта вытеснения, развитие которых приводит к формированию языка, возникают, по-видимому, из-за микронеоднородности поля проницаемости кварцевого песка. Устойчивый фронт вытеснения при близких вязкостях вытесняющей и вытесняемой жидкостей показал, что неоднородность поля проницаемости мала.

С увеличением скорости вытеснения до $v_0 = 7 \cdot 10^{-5}$ м/с количество языков не возрастает (см. рис. 2, б). Здесь приведены поперечные профили насыщенности вытесняющей жидкости в сечении $x/L = 0,26$ в моменты времени $\tau = 0,255$ и $0,5$ (точки 1, 2). Как и при $v_0 = 3,33 \cdot 10^{-5}$ м/с, наблюдалось преимущественное развитие одного языка с шириной, близкой к половине ширины образца пористой среды. Опытные данные по зависимости длины языка $l_j^* = l_j/H$ от времени для $v_0 = 7 \cdot 10^{-5}$, $3,33 \cdot 10^{-5}$ и $1,4 \cdot 10^{-6}$ м/с (точки 1, 2, 4) приведены на рис. 3 (точки 3 — зависимость от времени удвоенной амплитуды возмущения изосаты с $s^1 = 0,4$). При малых скоростях вытеснения фронт вытеснения устойчив даже при малом отношении вязкостей жидкостей $\mu_0 = 0,059$ (точки 4 на рис. 3).

Для вытеснения при хорошей смачиваемости пористой среды одной из жидкостей характерно развитое двухфазное течение во всей области

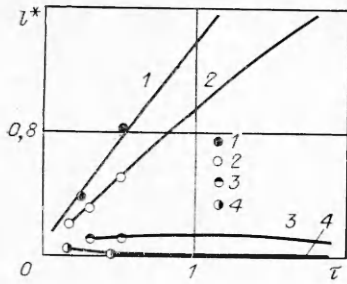


Рис. 3

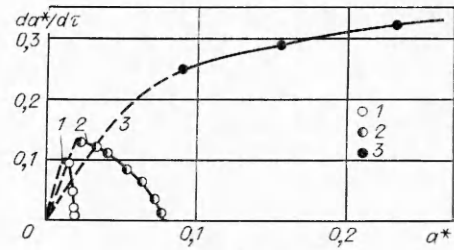


Рис. 4

вытеснения. Фронт вытеснения в этом случае включает в себя область двухфазного течения, в котором существуют большие, но конечные градиенты насыщенности вытесняющей жидкости (см. рис. 1, 2). Поэтому для обобщения экспериментальных данных по неустойчивому вытеснению в нелинейной стадии развития языков были выполнены расчеты неустойчивого вытеснения в рамках уравнений двухфазной фильтрации Маскета — Леверетта с учетом капиллярных сил. Методика расчетов описана в [7]. Расчеты проводились IMPES методом по консервативной разностной схеме в двумерной области при параметрах, соответствующих условиям опытов. Относительные фазовые проницаемости определены в опытах по устойчивому вытеснению и в условиях экспериментов рис. 1, 2 имеют вид

$$k_1(s) = 0,305s^{2,3} + 0,31s^{1,9}, \quad k_2(s) = (1 + 20s)^{0,125} [0,12(1 - s)^{1,6} + 0,35(1 - s)^{3,6}],$$

где $s = (s^1 - s_0^1)/(s_*^1 - s_0^1)$ — нормализованная насыщенность; s_*^1 — предельное значение насыщенности вытесняющей жидкости. Функция Леверетта найдена по кривой капиллярного давления: $J(s) = -0,226(s + 0,01)^{0,25} [1 + (s + 0,119)^3]$.

Так как рассматривается нелинейная стадия развития языков (длина языка сравнима с его шириной), то при численном моделировании начальная форма языков создавалась неравномерным по сечению расходом воды при $x/L = 0$ в начальные моменты времени $\tau \leq \tau_0$: $v(0, y, \tau) = v_0(1 - \alpha \cos 2\pi y)$. Величина α подбиралась так, чтобы при $x/L = 0,09$, т. е. на малых расстояниях от входа, длина языков l_f совпадала с наблюдаемой в эксперименте. При $\tau > \tau_0$ поддерживались краевые условия, соответствующие условиям опытов (постоянный по сечению расход воды при $x/L = 0$), и изучалось развитие языков.

Результаты расчетов скорости изменения амплитуды возмущений фронта вытеснения в зависимости от их амплитуды $a^* = a/H$ ($a = l_f/2$), выполненных для различных длин волн, приведены на рис. 4 (точки 1—3 — возмущения с длиной волны $\lambda/H = 0,2; 0,3$ и 1). Расчеты выполнены в прямоугольной области с шириной $H = 10 \lambda_c$, где λ_c — критическая длина волны, определенная в [7] как $\lambda_c = 2\pi\sigma\sqrt{km}\Phi_c(M_c + 1)/\mu_2 v_0 F_c(M_c - 1)$, $\Phi_c = \int_0^{s_c} k_2(s)F(s)(dJ/ds)ds$, $F_c = k_1(s_c)/(k_1(s_c) + \mu_0 k_2(s_c))$, $M_c = [k_1(s_c)\mu_0^{-1} + k_2(s_c)]/k_2(0)$ — отношение подвижностей на фронте вытеснения.

При $\lambda \leq \lambda_c$ капиллярная диффузия в зоне больших градиентов насыщенности вытесняющей жидкости в окрестности фронта вытеснения стабилизирует вязкостную неустойчивость и малые возмущения не развиваются. Возмущения с $\lambda_m = 2\lambda_c$ имеют в области малых амплитуд наибольшую скорость роста [7] — линия 1 на рис. 4. С увеличением длины волны скорость роста уменьшается — линии 2, 3 для $\lambda/\lambda_c = 3; 10$. В нелинейней стадии развития возмущений для $\lambda/\lambda_c = 2$ (точки 1 на рис. 4)

при $a^* = 0,018$ происходит стабилизация длины языка, на что указывалось в [6]. Это обусловлено увеличением капиллярного перетока вытесняющей жидкости от головной к хвостовой части растущего языка с ростом кривизны языка при увеличении его амплитуды. С увеличением длины волны предельная длина языка и скорость изменения его амплитуды возрастают [7] и при $\lambda/\lambda_c = 10$ в диапазоне амплитуд $a^* < 0,3$ стабилизации амплитуды не наблюдается, а скорость изменения амплитуды со временем максимальна (точки 3 на рис. 4). Таким образом, в нелинейной стадии развития возмущений происходит преимущественное развитие возмущений с длиной волны, равной ширине области вытеснения. Наличие возмущений с меньшими длинами волн приводит к искажению формы растущего языка, что и видно в экспериментальных профилях насыщенности рис. 2, а, б.

Сравнение опытных данных по структуре и динамике роста языков с результатами расчетов по модели Маскета — Леверетта, выполненных при $\lambda = H$, приведено на рис. 1—3. Результаты расчетов показаны кривыми, номера которых соответствуют номерам экспериментальных точек, с которыми производится сравнение. Особенности роста языков на начальном участке пористой среды, когда они малы, в расчетах не рассматривались, так как из анализа кривых рис. 4 следует, что в условиях проведения опытов ($H/L = 0,3$) рост возмущений с длиной волны максимального роста λ_m прекращается при $x/L = 0,03$ и их амплитуда не превышает $a/L = 0,015$. Развитие возмущений с большими длинами волн приводит к тому, что при $x/L = 0,09$ формируется один язык с $\lambda = H$. В связи с этим при проведении численных расчетов по модели Маскета — Леверетта формировалось возмущение с $\lambda = H$, имеющее при $x/L = 0,09$ амплитуду, совпадающую с экспериментальной. В дальнейшем поддерживались краевые условия, отвечающие условиям опыта (постоянный по сечению расход вытесняющей жидкости при $x/L = 0$). В целом во всей области вытеснения наблюдается хорошее совпадение результатов расчетов с опытными данными как по внутренней структуре области вытеснения (рис. 1, 2), так и по зависимости длины языков от времени (рис. 3). Расчетные кривые 1—4 на рис. 3 соответствуют $H/\lambda_c = 19,3; 9,2; 9,2$ и $0,4$. При $H/\lambda_c = 0,4$ роста возмущений как в расчетах, так и в экспериментах не наблюдалось.

В экспериментах была изучена также устойчивость фронта вытеснения при хорошем смачивании пористой среды вытесняющей жидкостью (краевой угол натекания на гладкой кварцевой пластине $\theta \approx 20^\circ$, оттекания ~ 0). Опыты показали, что при скоростях вытеснения $v_0 < 10^{-4}$ м/с во всем изучаемом диапазоне отношения вязкостей жидкостей $0,013 < \mu_0 < 0,8$ фронт вытеснения устойчив. Расчеты, выполненные при использовании фазовых проницаемостей и капиллярного давления, полученных для данного типа опытов, показали, что во всех опытах $H/\lambda_c \sim 1$ и заметного развития языков не наблюдается. Увеличение λ_c на порядок при одних и тех же параметрах вытеснения по сравнению с опытами, в которых вытесняющая жидкость не смачивает пористую среду, обусловлено в основном увеличением на порядок величины Φ_c для данного типа вытеснения. Изменение Φ_c , характеризующей интегральное действие капиллярных сил на фронте вытеснения, происходит из-за различного вида кривых относительных фазовых проницаемостей и капиллярного давления при дренаже и пропитке одной и той же пористой среды [5]. Численное моделирование развития языков при большой ширине модели ($H' > 10H$ и $H'/\lambda > 10$) показало, что и в этом случае развитие языков происходит качественно, как на рис. 1—4. Существенное уменьшение λ_c за счет увеличения скорости в данных опытах невозможно, так как при $v_0 > 10^{-4}$ м/с капиллярное число $N_c = v_0\mu/\sigma > 10^{-5}$ и вытеснение становится неравновесным [5].

Таким образом, сравнение результатов экспериментов и расчетов показало, что в условиях хорошей смачиваемости пористой среды одной из жидкостей вязкостное языкообразование хорошо описывается в рамках

модели Маскета — Леверетта. При этом капиллярные перетоки жидкостей от головной к хвостовой части языков являются основным механизмом, регулирующим развитие языков, в нелинейной стадии их роста.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кац Р. М., Таранчук В. Б. Обзор работ по исследованию устойчивости фильтрационных течений // Динамика многофазных сред.— Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1981.
2. Homsy G. M. Viscous fingering in porous media // Ann. Rev. Fluid Mech.— 1987.— V. 19.— P. 271.
3. Chuoke R. L., Van Meurs P., Van der Poel C. The instability of slow, immiscible, viscous liquid-liquid displacement in permeable media // Trans. AIME.— 1959.— V. 216.— P. 188.
4. Bensimon D., Kadanoff L. P. et al. Viscous flow in two dimension // Rev. Modern Phys.— 1986.— V. 58, N 4.
5. Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Движение жидкостей и газов в природных пластах.— М.: Недра, 1984.
6. Рыжик В. М., Кисиленко Б. Е. Исследование продвижения границы раздела воды и нефти в пористой среде // Физико-геологические факторы при разработке нефтяных и нефтегазоконденсатных месторождений.— М.: Недра, 1969.
7. Бочаров О. Б., Кузнецов В. В. Численное моделирование неустойчивого вытеснения в пористой среде // Численные методы решения задач фильтрации многофазной несжимаемой жидкости.— Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1987.

г. Новосибирск

Поступила 15/XII 1987 г.,
в окончательном варианте —
7/IV 1988 г.

УДК 532.517.6:532.11:533.69

А. Н. Антонов, К. Н. Филиппов

ПУЛЬСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ В ВЫЕМКЕ, ОБТЕКАЕМОЙ ДОЗВУКОВЫМ ИЛИ СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ ГАЗА

Проведено экспериментальное исследование пульсаций давления, возникающих при дозвуковом или сверхзвуковом обтекании выемки (выемка открытого типа [1]). Спектр пульсаций давления выемки характеризуется сплошной и дискретной составляющими. Изучению дискретной составляющей посвящены работы [2—8], где рассматривались механизм образования дискретной составляющей и ее характерные частоты. Некоторые данные по сплошной составляющей спектра представлены в [9].

В данной работе исследовано влияние параметров течения на уровни сплошной и дискретной составляющих в спектре пульсаций давления выемки.

1. Эксперименты проведены в дозвуковой и сверхзвуковой аэродинамических трубах. Испытанные модели составляют две группы. К группе I относятся цилиндры (или составная модель: конус — цилиндр), имеющие осесимметричные кольцевые выемки на боковой поверхности глубиной h и относительной длиной $l^0 = l/h$, ось модели совпадала с направлением вектора скорости потока; к группе II — плоские пластины, которые являлись боковой стенкой рабочей части аэродинамической трубы размером 70×50 мм. В этих пластинах были выполнены выемки глубиной h , относительной длиной $l^0 = l/h$ и шириной $b = 70$ мм.

Все эксперименты проведены с выемками прямоугольной формы (рис. 1, $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$, α_1, α_2 — угол между передней или задней стенкой выемки и ее дном). Параметры потока перед выемкой и размеры моделей, используемых в экспериментах, приведены в таблице, где M_1 — число Маха набегающего потока перед выемкой; T_0/T_w — отношение температуры торможения во внешнем потоке к температуре стенки; Re — число Рейнольдса, рассчитанное по параметрам внешнего потока и длине модели от критической точки до переднего края выемки; d — диаметр мишени модели; А, Б — группы экспериментов, проведенных соответственно в до- или сверхзвуковой аэродинамической трубе. Прямоугольная