

УДК 551.515: 532.5.18

СКОРОСТЬ ЧАСТИЦ И ПРОФИЛЬ РАСХОДА МАССЫ ПЕСКА В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ВЕТРОПЕСЧАНОГО ПОТОКА

Канд. физ.-мат. наук О.Е. Семенов

Исследование средней скорости частиц песка u_p в пограничном слое ветропесчаного потока показало, что на уровне 1 см u_p достигает 0,3...0,6 значения скорости потока воздуха, линейно возрастая с высотой. На высоте 6 см u_p уже достигает значений 0,74...0,86 скорости потока. Профиль расхода массы песка в этом слое имеет вид приподнятой над поверхностью струи и описывается двумя функциями: до высоты $z_1 = 2...3$ см –

$$q(z) = \text{число} \cdot q_{\max} \cdot \left(\frac{z - z_0}{x_0}\right)^b \cdot \exp\left(-\alpha \cdot \frac{z - z_0}{x_0}\right) \quad \text{и выше –}$$

$q(z) = q_1 (z/z_1)^{-\beta}$, где q_1 – расход песка на уровне z_1 , q_{\max} – максимальный расход на оси струи; α , β , b – числовые параметры; z_0 – параметр шероховатости и x_0 – средний геометрический размер частиц песка на поверхности.

После превышения критического значения скорости ветра, песок на поверхности приходит в движение. Перемещение частиц песка в потоке воздуха в приповерхностном пограничном слое происходит скачками (сальтацией) по определенным траекториям, параметры которых определяются размером частиц и динамическими характеристиками воздушного потока. При падении частицы передают свое количество движения другим, лежащим на поверхности песка, частицам, вызывая их лавинообразное вовлечение в поток.

Частицы песка во время своего движения по траектории полета отстают от потока воздуха. Это физическое явление напоминает отставание (скольжение) ротора асинхронного двигателя от вращающего его электрического поля. Поэтому назовем и эффект отставания частиц песка от потока воздуха «скольжением» и далее будем пользоваться этим термином.

Лишь на высотах свыше 1...2 м скорость частиц песка уже можно считать, равной скорости ветра или очень близкой к ней. Здесь переносятся уже частицы значительно меньшего размера, и преобладают процессы турбулентной диффузии.

Скольжение частиц песка в воздушном потоке

Изучение скорости движения и траекторий частиц песка имеет большое значение для понимания механизма взаимодействия воздушного потока с песчаными поверхностями, передачи импульсов силы от потока к поверхности, образования и движения эоловых форм микрорельефа. Эта информация необходима для построения моделей приповерхностного слоя ветропесчаного потока, в котором частицы песка перемещаются воздушным потоком со скоростями, меньшими, чем скорость воздуха. Исследования скоростей частиц песка имеет и большое прикладное значение для получения профилей твердого расхода песка при бурях, так как в этом слое ветропесчаного потока наблюдаются наибольшие значения концентрации частиц [1, 2, 7, 8].

Изучению траектории отдельно взятой сальтирующей частицы посвящено уже достаточно много работ как советских, так и зарубежных ученых. Наиболее полно рассмотрен процесс сальтации в работе Бютнер [1]. Рассматривая скорость частиц u_p при их движении вдоль траектории сальтации, она исследовала и отношение её к скорости разгоняющего их воздушного потока. Бютнер показала, что все элементы траектории частиц зависят от двух параметров: $\Gamma = w_0^2 / \sigma g d$ и безразмерной скорости $\tilde{u} = \bar{u} / w_0$. Величина \bar{u} – средняя скорость воздушного потока в слое от d (диаметр частицы песка) до высоты прыжка сальтирующей частицы h_p , w_0 – начальная вертикальная скорость вылета частицы, σ – отношение плотности частиц и воздуха, g – ускорение свободного падения. Для определения среднего квадрата относительной разности скорости потока и летящей частицы песка ею была получена формула

$$\frac{(\overline{u - u_p})^2}{\bar{u}^2} = \frac{1}{1 + \Gamma \tilde{u} \tilde{t}_n},$$

где \tilde{t}_n – полное время полета частицы по траектории, $u - u_p$ – разность скорости потока и частицы. Осреднение этой разности выполнено Бютнер

вдоль траектории частицы. Полученная по этой формуле зависимость отставания частицы от безразмерного параметра Γ показана на рис. 1.

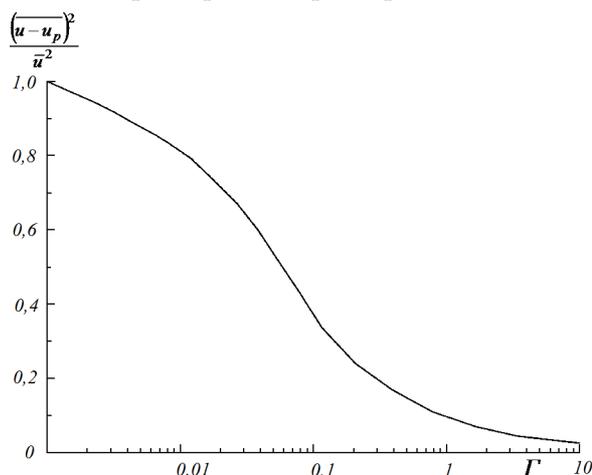


Рис. 1. Зависимость среднего квадрата относительной разности скорости потока и частицы от безразмерного параметра Γ по Бютнер [1].

Ветровой перенос песка начинается при значениях $\Gamma \approx 0,03$. При небольших значениях Γ частицы значительно отстают от разгоняющего их потока воздуха. С ростом Γ они летят с большими скоростями, но даже при значении $\Gamma > 1$ их отставание от воздушного потока ещё ощутимо.

Отметим возросший интерес к этому вопросу зарубежных ученых в последние два десятилетия [7, 8, 9]. Остановимся на результатах экспериментальных исследований, выполненных датскими учеными Расмуссеном и Соренсеном [9]. Они исследовали в пограничном слое аэродинамической трубы скорость сальтирующих монодисперсных кварцевых частиц очень крупного размера, характерного для прибрежных дюн Дании. Скорость частиц песка определялась лазерным доплеровским анемометром, скорость воздуха – приемником давления воздуха, соединенным с электронным микроанометром.

Расмуссен и Соренсен провели очень тонкие измерения с частицами размером 242 мкм при четырех значениях динамической скорости потока в интервале от 0,27 до 0,68 м/с и при трех – для частиц размером 320 мкм. В результате они получили изменение с высотой отношения скорости воздуха u_z к скорости частиц u_p . Для решаемой нами задачи удобнее иметь зависимость от высоты переноса обратного отношения (коэффициента скольжения) $k_s = u_p/u_z$, которая построена нами по данным Расмуссена и Соренсена на рис. 2.

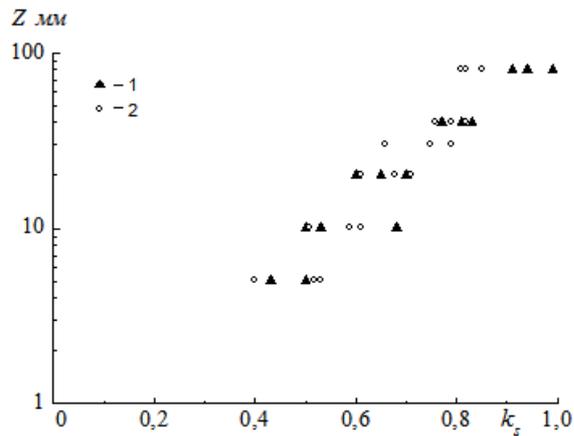


Рис. 2. Зависимость отношения $k_s = u_p / u_z$ от высоты переноса частиц при различных динамических скоростях и размере частиц: 1 – 242 мкм, 2 – 320 мкм по данным измерений Расмуссена и Соренсена [9].

На рис. 2 видно, что скорость частиц на высоте 0,5 см при динамической скорости $u_* = 0,27$ м/с (крайние левые точки графика) достигает всего 0,4 скорости воздуха. При больших величинах u_* , равных 0,56 и 0,68 м/с, скорость частиц на этом уровне не превышает 0,52...0,53 скорости ветра u_z . С увеличением высоты переноса частиц уменьшается и их отставание от потока воздуха. На уровне 5 см частицы летят уже со скоростями, близкими $0,8u_z$. На верхней границе пограничного слоя ветропесчаного потока на уровне 10 см скорость частиц достигает уже от 0,8 до 0,99 скорости потока воздуха u_z . Расмуссену и Соренсену удалось получить для искусственно выделенных монодисперсных частиц песка исключительно важные и интересные результаты.

К сожалению, реальный песок пустынь является не монодисперсной, а полидисперсной средой. Поэтому задачей наших исследований является получение профилей твердого расхода для полидисперсного песка пустынь в пограничном слое ветропесчаного потока. Для этого необходимо получить количественную оценку скольжения частиц реального песка с логарифмически нормальным распределением частиц по размеру. Ветропесчаный поток полидисперсного песка состоит из множества частиц твердой фазы потока различного размера, летящих даже на одном уровне с различными скоростями вследствие не только своего размера, плотности, но и местоположения на траектории движения. Исследовать такой поток методами лазерной доплеровской анемометрии пока невозможно. Для та-

кого неоднородного по скоростям потока частиц можно и нужно, по-видимому, получить средние по размеру и траектории коэффициенты скольжения $k_s = u_p / u_z$, используя другие методы исследований.

Как известно, массовая концентрация песка C_z в потоке и твердый расход массы песка q_z связаны между собой следующим равенством

$$q_z = u_p \cdot C_z.$$

Если измерить одновременно на одном уровне z средние значения концентрации и твердого расхода песка, то средняя скорость частиц песка на этой высоте получится простым делением этих двух физических величин

$$u_p = q_z / C_z.$$

Эксперименты по этому методу определения средней скорости частиц u_p , мы выполняли в аэродинамической трубе, измерения концентрации C_z делались на установке для её регистрации, подробно описанной в работах [4, 6].

Для измерения твердого расхода песка необходимо было иметь прибор для улавливания частиц песка на нужном нам уровне. За основу конструкции малогабаритного прибора была принята конструкция нашего пескоуловителя, много лет применявшегося для исследований переноса массы песка во время бурь в приземном слое атмосферы на метеорологических мачтах.

Малогабаритный прибор для измерения твердого расхода песка был изготовлен при сохранении геометрического подобия с большим пескоуловителем. Поэтому его систематические погрешности не должны быть больше, чем у полевого пескоуловителя. Внешний вид прибора представлен на рис. 3. Площадь его приемного отверстия равна 100 мм^2 , размер отверстия $5 \times 20 \text{ мм}$. Во время экспериментов твердый расход массы песка q_z определялся в слое высотой 5 мм в $\text{г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ на выбранном нами уровне измерения.

Эксперименты по исследованию скольжения частиц песка выполнялись для четырех значений динамической скорости потока следующим образом. Измерения проводились на 6...7 уровнях пограничного слоя ветропесчаного потока. Перед началом эксперимента включалась аэродинамическая труба и устанавливалась нужная скорость потока. Затем продувка продолжалась до того момента времени, пока не формировалась поверхность с эоловой рябью, характерной для этой скорости, поток приближался к стационарному режиму взаимодействия с поверхностью песка. После этого

проводилось измерение профиля скорости ветропесчаного потока. Аэродинамическая труба выключалась, и пескоуловитель устанавливался на исследуемом уровне над песчаной поверхностью так, чтобы середина его приемного отверстия оказывалась на требуемой высоте.



Рис. 3. Малогабаритный уловитель песка над поверхностью песка в аэродинамической трубе.

Луч лазерного регистратора концентрации песка устанавливался на нужной высоте z . Средняя линия входного отверстия пескоуловителя находилась непосредственно за лучом лазера. Записывалась прозрачность стекла. После этого вновь включалась аэродинамическая труба на заданный интервал времени, и регистрировалось лазерное излучение, ослабленное частицами песка. После окончания заданного интервала времени аэродинамическая труба выключалась. Определялась уловленная пескоуловителем масса песка, переносимая на заданной высоте ветропесчаного потока, рассчитывалась концентрация и твердый расход песка. Пескоуловитель устанавливался на следующую высоту, и все измерения повторялись. По этой методике проведено три эксперимента при динамической скорости потока $u_* = 0,49$ м/с, $u_* = 0,72$ м/с и $u_* = 0,9$ м/с. Один эксперимент был выполнен над ровной поверхностью песка при $u_* = 0,53$ м/с в условиях начала формирования эолового микрорельефа дна. Он показал, что над эоловым микрорельефом концентрация и расход массы песка в 1,5 раза меньше, чем над ровной поверхностью. Результаты измерений и вычислений для крупного песка с логарифмически нормальной функцией распределения частиц по размерам с параметрами $x_0 = 172$ мкм, $\sigma_{\lg x} = 0,15$ [3] представлены в табл. 1 для четырех значений динамической скорости u_* и на рис. 4.

Таблица 1

Результаты экспериментов по определению средней скорости частиц песка и их коэффициента скольжения k_s ($x_0 = 172$ мкм, $\sigma_{lgx} = 0,15$)

Динамическая скорость $u_* = 0,49$ м/с

z , см	C , мг/см ³	q , г·см ⁻² ·с ⁻¹	u_p , см/с	u_z , см/с	k_s
1,6	0,247	0,054	217	540	0,40
2	0,175	0,043	244	580	0,42
3	0,062	0,023	373	610	0,61
4	0,035	0,014	406	650	0,62
5	0,024	0,011	461	680	0,68
6	0,015	0,008	544	705	0,77

Динамическая скорость $u_* = 0,53$ м/с

z , см	C , мг/см ³	q , г·см ⁻² ·с ⁻¹	u_p , см/с	u_z , см/с	k_s
1	0,569	0,095	167	550	0,30
2	0,265	0,066	245	645	0,38
3	0,138	0,054	387	700	0,55
4	0,078	0,035	449	730	0,61
5	0,037	0,019	502	760	0,66
6	0,0236	0,014	594	790	0,75

Динамическая скорость $u_* = 0,72$ м/с

z , см	C , мг/см ³	q , г·см ⁻² ·с ⁻¹	u_p , см/с	u_z , см/с	k_s
1	0,237	0,046	195	460	0,42
2	0,082	0,024	294	550	0,53
3	0,050	0,016	330	570	0,58
4	0,033	0,013	386	620	0,62
5	0,024	0,011	469	660	0,71
6	0,018	0,009	513	690	0,74

Динамическая скорость $u_* = 0,9$ м/с

z , см	C , мг/см ³	q , г·см ⁻² ·с ⁻¹	u_p , см/с	u_z , см/с	k_s
1	0,399	0,088	220	380	0,58
1,6	0,242	0,071	296	485	0,61
2	0,132	0,044	330	520	0,63
3	0,056	0,025	437	625	0,70
4	0,045	0,024	531	680	0,78
5	0,022	0,014	639	745	0,86
6	0,017	0,011	668	780	0,86

На рис. 4 видно, что с ростом динамической скорости ветропесчаного потока наклон профилей коэффициента скольжения частиц песка и их значения изменяются. Чем больше скорость потока, тем она круче, т.е. меньше интервал изменения коэффициента скольжения. При небольших скоростях потока частицы песка отстают от потока воздуха на нижнем уровне измерений очень значительно. Их средняя скорость составляет всего лишь около 30...40 % от скорости воздушного потока. На верхней границе пограничного слоя отставание уменьшается до 15...20 %. При боль-

ших скоростях воздуха частицы отстают от потока меньше, особенно на нижних уровнях. В ветропесчаном потоке при $u_* = 0,72$ м/с на высоте 1 см скорость частиц составляет 0,4...0,5 от скорости воздушного потока, при $u_* = 0,9$ м/с – 0,6 от скорости воздуха. На верхней границе пограничного слоя ($z = 6$ см) скорость частиц в обоих случаях близка к 0,8 (0,75...0,85) скорости потока воздуха. Эти же значения скоростей частиц песка получены у Рассмусена и Соренсена для уровня 5 см. Анализ рис. 2 и рис. 4 показывает, что значения k_s в наших экспериментах близки к результатам Рассмусена и Соренсена.

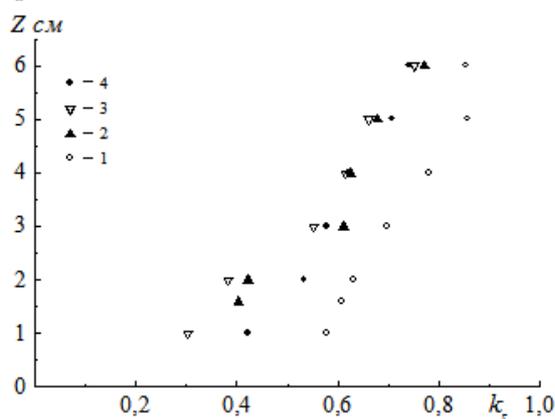


Рис. 4. Изменение с высотой коэффициента скольжения частиц песка $k_s = u_p / u_z$ по результатам всех четырех экспериментов при различных значениях динамической скорости: 1 – $u_* = 0,9$ м/с, 2 – $u_* = 0,53$ м/с, 3 – $u_* = 0,49$ м/с, 4 – $u_* = 0,72$ м/с.

Очевидно, что для практического применения необходимо получить аналитические зависимости для профилей средних коэффициентов скольжения частиц при различных значениях u_* , которые более удобны при проведении вычислений. Поэтому для четырех значений динамической скорости потока, при которых были выполнены наши измерения, получены линейные уравнения с высоким значением коэффициента корреляции r , позволяющие получать значения средней по размерам и по траектории скорости полета частиц реального пустынного песка на различных уровнях пограничного слоя ветропесчаного потока. Эти уравнения представлены ниже:

$$\begin{aligned}
 u_p &= u_z (0,29 + 0,08z), \quad \text{для } u_* = 0,49 \text{ м/с}, \quad r = 0,96 \pm 0,04 \\
 u_p &= u_z (0,23 + 0,09z), \quad \text{для } u_* = 0,53 \text{ м/с}, \quad r = 0,98 \pm 0,03
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$u_p = u_z(0,38 + 0,06z), \text{ для } u_* = 0,72 \text{ м/с, } r = 0,97 \pm 0,02$$

$$u_p = u_z(0,52 + 0,06z), \text{ для } u_* = 0,90 \text{ м/с, } r = 0,98 \pm 0,02.$$

Сопоставимость значения k_s с результатами Рассмусена и Соренсена говорит о перспективности принятого нами метода исследований скольжения частиц реального полидисперсного песка в ветропесчаном потоке. Но есть и отличие в полученных результатах. У датских ученых зависимость коэффициента скольжения от высоты является нелинейной функцией. У нас осреднение по большому ансамблю числа частиц различного размера и по различным участкам их траекторий привело к линейному виду функции $k_s = f(z)$. Причиной этого может быть как результат осреднения большого ансамбля размеров частиц, так и меньшая точность получения значений скорости частиц в наших экспериментах.

Твердый расход песка в пограничном слое ветропесчаного потока

Во время исследований скольжения частиц песка относительно потока воздуха, были измерены профили твердого расхода малогабаритным уловителем песка, перемещаемым по высоте ветропесчаного потока. На рис. 5 приведены графики твердого расхода песка в пограничном слое ветропесчаного потока в логарифмической системе координат, полученные нами с осреднением в несколько минут. Выше 2 см профили на рисунке аппроксимируются степенной зависимостью

$$q(z) = q_1 (z/z_1)^{-\beta}, \quad (2)$$

где q_1 – расход песка на уровне z_1 . В нашем случае $z_1 = 2$ см. Ниже уровня 1,6...2 см при больших скоростях потока экспериментальные точки начинают отклоняться от функции (2). Каким должен быть профиль расхода ниже 2 см? Определить его вид по измерениям пескоуловителем невозможно.

Для ответа на этот вопрос привлечем результаты наших измерений массовой концентрации песка в пограничном слое ветропесчаного потока [4, 5, 6]. Теперь, когда мы знаем изменение с высотой коэффициента скольжения частиц песка в потоке воздуха при различных значениях u_* , можно получить и профили твердого расхода, используя синхронно измеренные профили скорости воздушного потока и массовой концентрации

$$q(z) = u_p(z) \cdot C_z = k_s \cdot u(z) \cdot C(z).$$

Вычисление профилей твердого расхода проводилось в следующей последовательности. По значениям u_* и z_0 определялись значения скоро-

сти $u(z) = \frac{u_*}{K} \ln \frac{z}{z_0}$ для каждого уровня измерения массовой концентра-

ции частиц. Коэффициент скольжения частиц k_s для этих же высот находился по наиболее подходящему его профилю по значению динамической скорости. Для расчетов они представлены в виде линейных уравнений (1), по которым k_s определялся для нужной высоты. По известным для каждого уровня значениям концентрации, скорости воздуха и коэффициенту скольжения вычислялась скорость частиц и твердый расход песка.

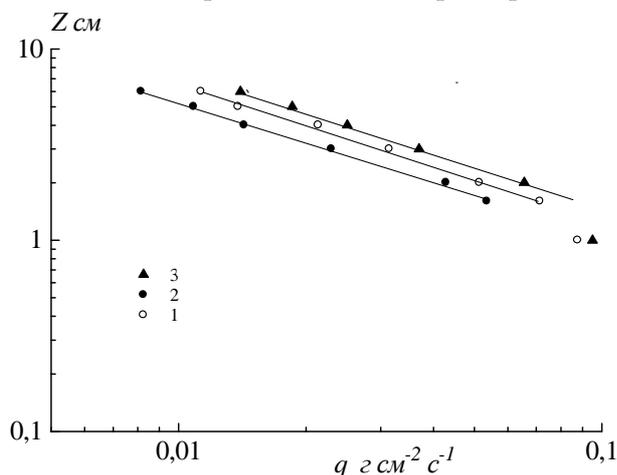


Рис. 5. Измеренные пескоуловителем профили твердого расхода песка в пограничном слое ветропесчаного потока при динамических скоростях: 1 – 0,72 м/с, 2 – 0,53 м/с, 3 – 0,92 м/с.

Начнем рассмотрение полученных этим методом профилей твердого расхода песка с больших значений динамической скорости потока. Он представлен на рис. 6 в виде точек. Струйный вид профилей, естественно, характерен не только для массовой концентрации песка в пограничном слое ветропесчаного потока [4, 5, 6], но и для профилей твердого расхода. Максимальное значение твердого расхода в рассматриваемой струе находится на большей высоте (12 мм), чем максимальная концентрация массы песка в ней (3 мм). И это было характерно для всех полученных профилей расхода песка, что объясняется быстрым ростом с высотой средних значений скорости частиц песка в этом слое.

Принятый нами подход к исследованию профилей твердого расхода песка имеет ограничение по минимальной высоте его определения. Им является значение параметра шероховатости поверхности z_0 . Так как на

высоте z_0 скорость потока по логарифмическому закону обращается в ноль, то и рассчитанная скорость частиц и расход массы песка также становятся равными нулю. Хотя мы знаем, что частицы двигаются и по самой поверхности песка.

Профиль $q(z)$ для динамической скорости $u_* = 1,5$ м/с на рис. 6 начинается с высоты $z_0 = 0,4$ см. Исходный же для вычислений профиль $C(z)$ был измерен значительно ниже этого уровня – с высоты 0,5 мм. Как известно, в ветропесчаном потоке z_0 изменяется в широком интервале значений при возрастании динамической скорости, но заметное влияние на профиль твердого расхода песка начинается лишь при больших скоростях потока, когда z_0 превышает средний геометрический размер песка x_0 , примерно, в пять и более раз. Но и получение профилей в пограничном слое ветропесчаного потока с таким разрешением является большим достижением, так как значения твердого расхода для пустынного песка и его струйное строение в этом слое получены впервые. Возможно, этот недостаток может быть устранен выбором другой аппроксимирующей измерения скорости потока функции, и её экстраполяции до уровня $z = x_0$, где расход песка должен обуславливаться скоростью передвижения эоловой ряби.

На рис. 6 проведены кривые, аппроксимирующие результаты измерений двумя функциями вида (2) и (3)

$$q(z) = A \cdot z^b \exp(-\alpha \cdot z), \quad (3)$$

которые аналогичны ранее примененным для описания профилей массовой концентрации песка [4, 5, 6]. Хорошо видно, насколько более информативны рассчитанные профили $q(z)$ на рис. 6 по сравнению с измеренными пескоуловителем (рис. 5). Они позволяют детально видеть картину переноса массы песка с высоты 0,5...2 мм от дна потока и до верхней границы пограничного слоя.

При небольших скоростях потока, струи частиц песка описываются функцией (3). С увеличением скорости потока над поверхностью формируется струя частиц песка, верхняя часть которой размывается турбулентными вихрями. Частицы в этой части потока начинают вовлекаться в процесс турбулентного обмена. Как показали эксперименты, профиль твердого расхода песка в пограничном слое ветропесчаного потока при динамических скоростях потока $u_* > 0,45...0,5$ м/с уже описывается двумя функциями (2) и (3). Эта граница значений u_* в аэродинамической трубе ещё требует уточнения.

Но и в естественных условиях для мелких песков с $x_0 \in [90, 120 \text{ мкм}]$ переход переноса частиц ветром от песчаного поэмка в песчаную бурю происходит при динамической скорости около 0,4 м/с [2, 6].

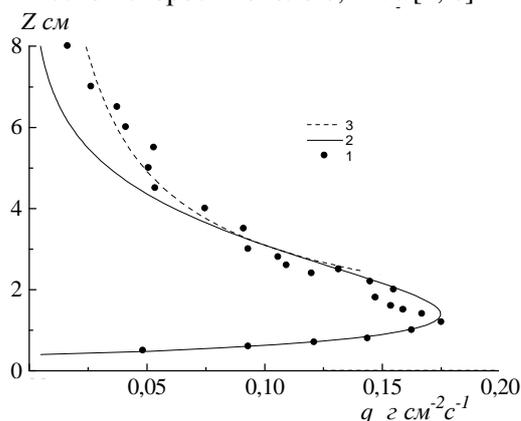


Рис. 6. Профиль твердого расхода ветропесчаного потока при $u_* = 1,5 \text{ м/с}$. 1 – эмпирические точки, 2 – график функции вида (3), 3 – график функции вида (2).

Как и в случае с профилями концентрации, уравнения (4) формально описывают профили твердого расхода, но они удобны для вычисления общего расхода песка в пограничном слое ветропесчаного потока при их

интегрировании $Q_z = \int_0^z q(z) dz$.

$$q(z) = \begin{cases} 0,105 \cdot (z/3)^{-1,5} & \text{для } z \geq 3 \text{ см} \\ 0,385 \cdot (z - z_0)^{0,79} \exp[-0,79(z - z_0)] & \text{для } z_0 \leq z \leq 3 \text{ см} \end{cases}, \quad (4)$$

где $z_0 = 0,4 \text{ см}$.

Их численное интегрирование для функций (4) дало следующие результаты:

$$Q_1 = \int_{0,4}^3 q(z) dz = 0,365 \text{ г} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \text{ и } Q_2 = \int_3^8 q(z) dz = 0,244 \text{ г} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Общий расход в слое 0,4...8 см: $Q_z = Q_1 + Q_2 = 0,609 \text{ г} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

Недостатком формулы $q(z) = A \cdot z^b \exp(-\alpha \cdot z)$ является неопределенность зависимости её параметров от параметров ветропесчаного потока и размеров частиц песка на поверхности. Ей присущи и другие недостатки – размерность величины (z^b) и показателя степени при экспоненте ($-\alpha \cdot z$); физическая неопределенность параметра A . Последний должен

иметь размерность твердого расхода песка $M L^{-2} T^{-1}$, тогда как $(-\alpha \cdot z)$ и (z^b) должны быть безразмерными величинами. Избавиться от этих недостатков мы попытались путем введения безразмерной высоты переноса, полученной нормированием высоты z на средний геометрический размер частиц песка на поверхности x_0 , и твердого расхода песка $q(z)$ на его максимальное значение q_{\max} на оси приповерхностной струи песка. После введения нормирования место параметра A в формуле для описания профиля твердого расхода песка в струе должно занимать значение измеряемой величины q_{\max} с размерностью $M L^{-2} T^{-1}$, и сама она принять вид

$$q(z) = q_{\max} \cdot \left(\frac{z - z_0}{x_0} \right)^b \cdot \exp \left(-\alpha \cdot \frac{z - z_0}{x_0} \right). \text{ В результате этих преобразований}$$

координат и подбора значений параметров b и α была получена аппроксимирующая профиль твердого расхода функция

$$q(z) = \text{число} \cdot q_{\max} \cdot \left(\frac{z - z_0}{x_0} \right)^b \cdot \exp \left(-\alpha \cdot \frac{z - z_0}{x_0} \right), \quad (5)$$

т.е., к сожалению, избавиться от числового множителя перед q_{\max} нам не удалось. На рис. 7 представлен уже рассмотренный выше профиль твердого расхода песка (рис. 6) в безразмерной системе координат.

Аппроксимирующие результаты измерений функции в новой системе координат имеют следующий вид

$$q(z) = \begin{cases} 0,31 q_{\max} (z/270 x_0)^{-1,7} \\ 0,31 q_{\max} \left(\frac{z - z_0}{x_0} \right)^{0,42} \exp \left[-0,0097 \left(\frac{z - z_0}{x_0} \right) \right] \end{cases}. \quad (6)$$

Таким образом, функции системы (6) имеют теперь размерность $M L^{-2} T^{-1}$ и включают параметры потока: q_{\max} , x_0 , z_0 . Аналогичный вид имеют и функции, описывающие профили твердого расхода при динамических скоростях 0,76 и 1 м/с.

На рис. 8 показан профиль $q(z)$ для $u_* = 1$ м/с и $z_0 = 0,2$ см = $12 x_0$, который описывается системой уравнений (7)

$$q(z) = \begin{cases} 0,038 \cdot (z/3)^{-1,4} & \text{для } z \geq 3 \text{ см} \\ 0,178 \cdot (z - 0,2)^{0,75} \exp[-0,81(z - 0,2)] & \text{для } 0,2 \text{ см} \leq z \leq 3 \text{ см} \end{cases}. \quad (7)$$

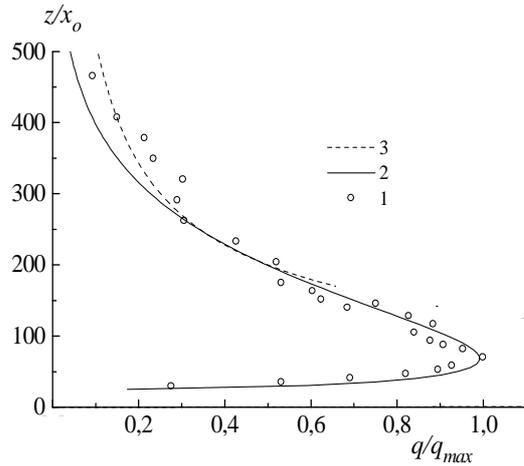


Рис. 7. Профиль твердого расхода ветропесчаного потока при $u_* = 1,5 \text{ м/с}$ и аппроксимирующие его функции (4). 1 – эмпирические точки, 2 – график функции вида (3), 3 – график функции вида (2).

Общий расход песка при этой динамической скорости в слое от 0,2 до 7 см равен сумме двух интегралов

$$Q_1 = \int_{0,2}^3 q(z) dz = 0,159 \text{ г}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{с}^{-1} \quad \text{и} \quad Q_2 = \int_3^8 q(z) dz = 0,082 \text{ г}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}.$$

$$Q_z = Q_1 + Q_2 = 0,241 \text{ г}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}.$$

На следующем рис. 9 этот профиль твердого расхода представлен уже в безразмерной системе координат.

Ниже дается система (8) из двух функций, описывающих этот полученный профиль твердого расхода песка.

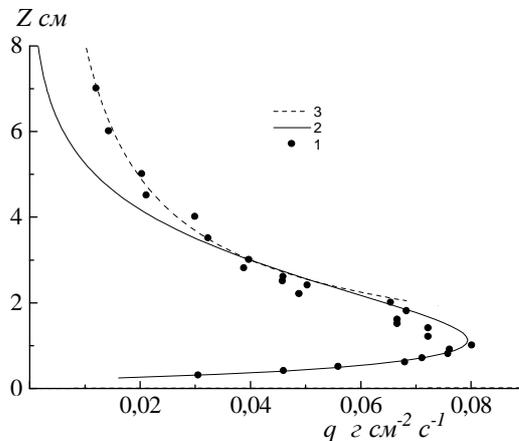


Рис. 8. Профиль твердого расхода ветропесчаного потока при $u_* = 1 \text{ м/с}$. 1 – эмпирические точки, 2 и 3 – графики функции (7).

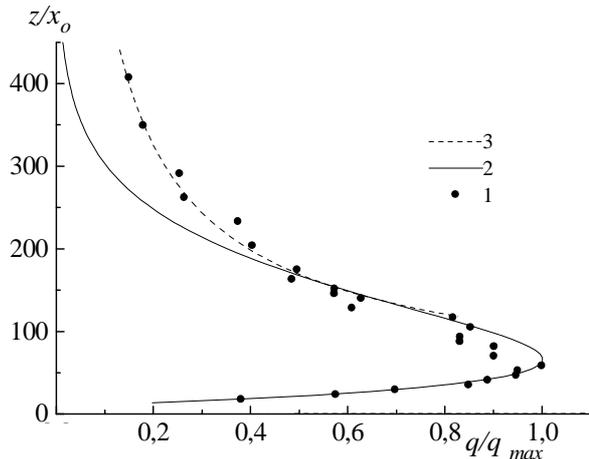


Рис. 9. Профиль твердого расхода ветропесчаного потока при $u_* = 1$ м/с. 1 – эмпирические точки, 2 и 3 – графики функции (8).

$$q(z) = \begin{cases} 0,497 q_{\max} (z/170x_0)^{-1,4} & \text{для } z \geq 170x_0 \\ 0,0655 q_{\max} \left(\frac{z-z_0}{x_0}\right)^{0,9} \exp\left[-0,016 \left(\frac{z-z_0}{x_0}\right)\right] & \text{для } z_0 \leq z \leq 170x_0 \end{cases} \quad (8)$$

Такой же вид имеет профиль расхода песка и при динамической скорости потока $u_* = 0,76$ м/с и $z_0 = 0,14$ см = $8x_0$. Поэтому рисунок с его изображением не приведен, а даны лишь аппроксимирующие функции. В безразмерной системе координат он описывается следующими двумя функциями

$$q(z) = \begin{cases} 0,4 q_{\max} (z/245x_0)^{-1,45} & \text{для } z \geq 245x_0 \\ 0,314 q_{\max} \left(\frac{z-z_0}{x_0}\right)^{0,4} \exp\left[-0,0083 \left(\frac{z-z_0}{x_0}\right)\right] & \text{для } z_0 \leq z \leq 245x_0 \end{cases} \quad (9)$$

Общий расход песка при этой динамической скорости в слое от z_0 до 7 см $Q_z = 0,118$ г см⁻¹·с⁻¹ и равен сумме двух интегралов

$$Q_1 = \int_{0,14}^3 q(z) dz = 0,076 \text{ г см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \text{ и } Q_2 = \int_3^7 q(z) dz = 0,042 \text{ г см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Значительно более сложное строение имеет поток массы песка при меньших его скоростях над хорошо сформированной эоловой рябью.

На рис. 10 приведен полученный профиль расхода песка при динамической скорости $u_* = 0,46$ м/с, удовлетворительно описанный одной функцией

$$q(z) = 0,059 z^{0,07} \exp(-0,6z). \quad (10)$$

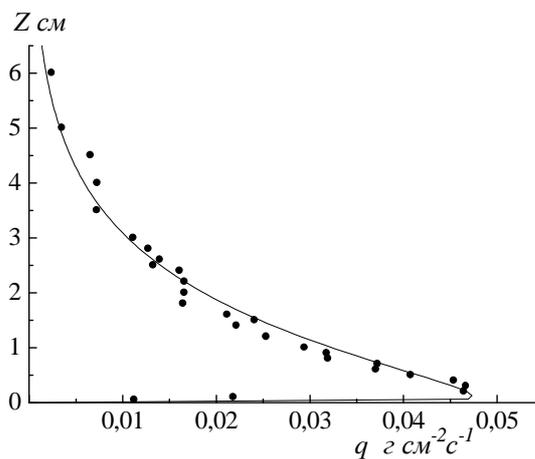


Рис. 10. Профиль твердого расхода песка в пограничном слое ветропесчаного потока при $u_* = 0,46$ м/с и его аппроксимация.

При более внимательном рассмотрении экспериментальных точек на этом рисунке видно, что можно выделить не одну, а три струи песка.

Тонкая структура потока этого экспериментального профиля твердого расхода показана на рис. 11. Профиль твердого расхода массы песка при этой скорости потока описан системой из трех уравнений (11)

$$q(z) = \begin{cases} 0,016(z - 3,5)^{0,45} \exp[-(z - 3,5)] & \text{для } z \geq 3,5 \text{ см} \\ 0,042(z - 1,8)^{0,45} \exp[-1,2(z - 1,8)] & \text{для } 3,5 \text{ см} \geq z \geq 1,8 \text{ см} \\ 0,08 z^{0,22} \exp(-0,92 z) & \text{для } z \leq 1,8 \text{ см} \end{cases} \quad (11)$$

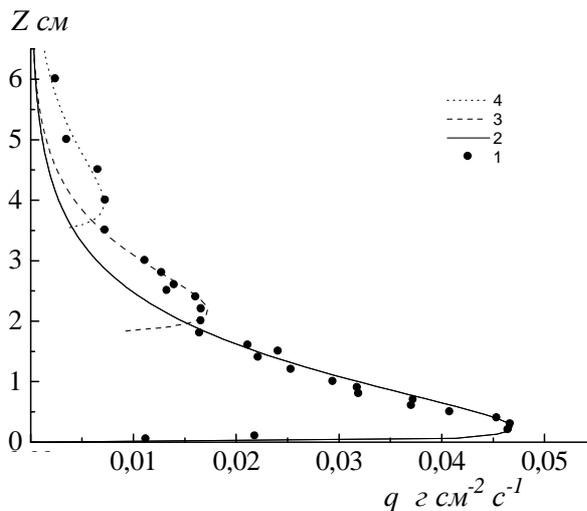


Рис. 11. Аппроксимация профиля твердого расхода песка в пограничном слое ветропесчаного потока при $u_* = 0,46$ м/с системой функций (11).
1 – эмпирические точки, 2, 3, 4 – графики функций (11).

Интерес представляет определение общего расхода песка для обоих вариантов описания такого сложного профиля расхода песка с целью оценки их различия. Ведь для практического применения предпочтителен более простой способ вычислений, если погрешности вычисления по нему общего расхода песка незначительны. Общий расход песка в измеренном слое потока по

формуле (10) оказался равным $Q_z = \int_0^6 q(z) dz = 0,0951 \text{ г}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$.

По системе формул (11) $Q_1 = \int_0^{1,8} q(z) dz = 0,0601 \text{ г}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$,

$Q_2 = \int_{1,8}^{3,5} q(z) dz = 0,0217 \text{ г}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$, $Q_3 = \int_{3,5}^6 q(z) dz = 0,019 \text{ г}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$, а сумма

всех трех интегралов $Q_z = 0,1008 \text{ г}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$. Таким образом, различие между двумя методами вычисления общего расхода достигает 5,6 %, т.е. погрешность более простого способа ощутима.

Наконец, представим этот профиль в безразмерной системе координат (рис. 12).

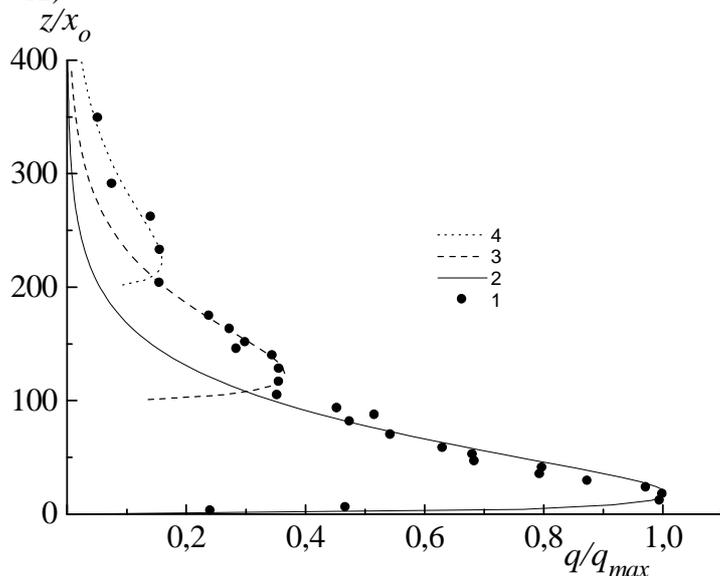


Рис. 12. Профиль твердого расхода песка в пограничном слое ветропесчаного потока при $u_* = 0,46 \text{ м/с}$ в безразмерной системе координат. 1 – эмпирические точки; 2, 3, 4 – графики функции (12).

Аналитическое описание его дано системой уравнений (12)

$$q(z) = \begin{cases} 0,075 q_{\max} \left(\frac{z}{x_0} - 200 \right)^{0,35} \exp \left[-0,021 \left(\frac{z}{x_0} - 200 \right) \right] & \text{для } z \geq 200x_0 \\ 0,14 q_{\max} \left(\frac{z}{x_0} - 100 \right)^{0,45} \exp \left[-0,019 \left(\frac{z}{x_0} - 100 \right) \right] & \text{для } 200x_0 \geq z \geq 100x_0 \\ 0,49 q_{\max} \left(\frac{z}{x_0} \right)^{0,38} \exp \left(-0,021 \frac{z}{x_0} \right) & \text{для } z \leq 100x_0 \end{cases} \quad (12)$$

Сделанное аналитическое описание профилей твердого расхода остается всё-таки формальным, несмотря на введение параметров потока q_{\max} , x_0 , z_0 , так как не получены зависимости числового множителя при q_{\max} , показателя степени b при $\left(\frac{z - z_0}{x_0} \right)$ и множителя α в показателе экспоненты от динамической скорости потока или динамического аналога числа Фруда. В дальнейшем необходимо получить эти зависимости, как это было сделано для профилей массовой концентрации [5, 6].

В заключение отметим, что исследования эффекта скольжения и профилей твердого расхода необходимо продолжить. Выполненные исследования – лишь первые шаги в изучении строения пограничного слоя ветропесчаного потока. В результате одновременного измерения профилей массовой концентрации песка и его твердого расхода, были получены профили коэффициента скольжения частиц $k_s = u_p / u_z$ в пограничном слое ветропесчаного потока для разных значений динамической скорости потока. Коэффициенты скольжения имеют осредненные значения как по размерам летящих на данном уровне частиц реального песка, так и по различным элементам траекторий сальтирующих частиц. Получить более точные значения можно путем совершенствования эксперимента по их определению. В первую очередь, необходимо более точно знать среднее значение концентрации песка $\overline{C_z(t)}$, так как она изменяется во время эксперимента. Поэтому нужна непрерывная регистрация и определение её значения путем интегрирования записи во времени

$$\overline{C_z(t)} = \frac{1}{t} \int_0^t C_z(t) dt.$$

Четыре профиля твердого расхода Баттерфайльда [7], наши шестнадцать профилей массовой концентрации песка [4 – 6] и пять профилей твердого расхода – только первые шаги в изучении переноса массы песка в погра-

ничном слое ветропесчаного потока. Но и они позволили получить принципиально новые результаты по взаимодействию воздушного потока с поверхностью подвижного песка, определить не только формы профилей массовой концентрации и твердого расхода над поверхностью, но и дать их аналитическое описание, получить общий расход массы в тонких струях песка.

На всех рисунках видна хорошая сшивка двух функций для описания профилей переносимой массы песка (2) и (3) на высотах 2,5...3 см от поверхности песка. Описание верхней части струи песка в пограничном слое ветропесчаного потока и профиля твердого расхода песка во время бурь в приземном слое атмосферы одной степенной функцией $q(z) = q_1(z/z_1)^{-\beta}$ говорит о кинематическом подобии обоих процессов. Это позволяет надеяться, что показатель степени β этой формулы для пограничного слоя также является функцией отношения w_g/u_* , как и для естественных ветропесчаных потоков [2, 6].

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить глубокую благодарность А.П. Шапову за помощь при постановке и проведении экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бютнер Э.К. Динамика приповерхностного слоя воздуха. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 158 с.
2. Гидрометеорологические проблемы Приаралья. / Под ред. Г.Н. Чичасова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 277 с.
3. Семенов О.Е. О распределении песчаных частиц по размерам на юге Казахстана вследствие эоловых процессов // Тр. КазНИГМИ. – 1970. – Вып. 36. – С. 153-165.
4. Семенов О.Е. О массовой концентрации частиц в пограничном слое ветропесчаного потока. // Гидрометеорология и экология. – 2009. – № 2 – С. 7-27.
5. Семенов О.Е. О физическом содержании параметров профилей массовой концентрации частиц в пограничном слое ветропесчаного потока. // Гидрометеорология и экология. – 2010. – № 1 – С. 7-27.
6. Семенов О.Е. Введение в экспериментальную метеорологию и климатологию песчаных бурь. – Алматы: 2011. – 580 с.
7. Butterfield G.R. Near-bed mass flux profiles in aeolian sand transport: High-resolution measurements in wind tunnel // Earth Surface Processes and Landforms. – V. 24. – 1999. – P. 393-412.

8. Liu X., Dong Z. Vertical profiles of Aeolian sand mass flux // Geomorphology. – 2004 – No 59. – P. 205-218.
9. Rasmussen K.R., Sorensen M. The vertical variation of particile speed and flux density in aeolian saltation: measurement and modeling. – University of Aarhus. Denmark. Preprint. 2008. – 24 p.

КазНИИЭК, г. Алматы

**ЖЕЛДІ ҚҰМ АҒЫМЫНЫҢ ШЕКАРАЛЫҚ ҚАБАТЫНДАҒЫ
БӨЛШЕКТЕР ЖЫЛДАМДЫҒЫ МЕН ҚҰМ САЛМАҒЫНЫҢ
КЕСКІНДІ ШЫҒЫНЫ**

Физ.-мат. ғылымд. канд. О.Е. Семенов

Желді құм ағымының шекаралық қабатындағы құм бөлшектерінің орташа жылдамдығын u_p зерттеу, 1 см деңгейде u_p ауа ағымы жылдамдығының 0,3...0,6-на жетеді, және деңгейдің биіктеуімен ұлғаяды. 6 см биіктікте u_p ағым жылдамдығының 0,74...0,76 көрсеткішіне жетеді. Құм салмағының кескінді шығыны осы қабатта ақпа бетінен көтеріңкі түрге ие және екі түрлі функциямен сипатталады: биіктікке дейін $z_1 = 2...3$ см –

$$q(z) = \text{сан} \cdot q_{\max} \cdot \left(\frac{z - z_0}{x_0} \right)^b \exp \left(-\alpha \cdot \frac{z - z_0}{x_0} \right) \quad \text{және биігірек –}$$

$q(z) = q_1 (z/z_1)^{-\beta}$, мұндағы q_1 – z_1 деңгейдегі құм шығыны, q_{\max} – ақпа осіндегі максималды шығын; α, β, b – сандық параметрлер; z_0 – кедір-бұдырлық параметр және x_0 – беттегі құм бөлшектерінің орташа геометриялық өлшемі.