

УДК 551.515.3 (262.83)

**О РАСХОДЕ МАССЫ ПЕСКА ПРИ ПЕСЧАНЫХ БУРЯХ НА
ОСУШЕННОЙ ЧАСТИ ДНА АРАЛА**

Канд. физ.-мат. наук О.Е. Семенов

Анализируются результаты измерений профилей твердого расхода песка в приземном слое атмосферы при бурях. Дается в вероятностном виде зависимость общего расхода песка в этом слое от аналога безразмерного числа Фруда $Fr_ = u_*^2 / (g \cdot x_0)$, где u_* – динамическая скорость, g – ускорение свободного падения, x_0 – средний геометрический размер частиц песка на поверхности.*

$$Q_{z5\%} = 7,78 \cdot 10^{-7} [u_*^2 / (g \cdot x_0)]^2; \quad Q_{z16\%} = 3,82 \cdot 10^{-7} [u_*^2 / (g \cdot x_0)]^2;$$

$$Q_{z50\%} = 2 \cdot 10^{-7} [u_*^2 / (g \cdot x_0)]^2; \quad Q_{z84\%} = 3,02 \cdot 10^{-8} [u_*^2 / (g \cdot x_0)]^{2,28};$$

$$Q_{z95\%} = 7,94 \cdot 10^{-9} [u_*^2 / (g \cdot x_0)]^{2,42}.$$

Для климатических расчетов переноса масс песка при бурях рекомендуется зависимость 50-ти процентной обеспеченности.

Песчаные (пыльные) бури являются результатом взаимодействия большого числа параметров, которые можно разделить на две группы, характеризующие, соответственно, состояние приземного слоя атмосферы и поверхностного слоя почвы. Дисперсный состав частиц определяет критическое значение скорости ветра и влажности песка, при достижении которых возможно перемещение частиц твёрдой фазы в воздушном потоке. От него зависит переносимая ветром масса песка и другие характеристики ветропесчаного потока. Поэтому изучение пыльных, песчаных и солевых бурь невозможно без углубленных знаний о закономерностях распределений частиц твёрдой фазы по размерам.

Проведенные исследования дисперсного состава песчаных массивов Казахстана показали, что в подавляющем числе случаев распределение частиц песка по размерам у подвижных и полужакрепленных песков аппроксимируется логарифмически нормальным распределением с плотностью

$$f(x) = \frac{0,434}{\sigma_{\lg x} x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\lg x - \lg x_0)^2}{2\sigma_{\lg x}^2} \right], \quad (1)$$

где x – размер частиц, x_0 – средний геометрический размер песчинок, $\sigma_{\lg x}$ – среднее квадратическое отклонение $\lg x$ (стандартное геометрическое отклонение). Это распределение полностью описывается всего лишь двумя параметрами, x_0 и $\sigma_{\lg x}$. Средний геометрический размер песка x_0 определяется на графике интегральной кривой распределения размером частиц 50 % вероятности $x_0 = x_{50\%}$. Стандартное геометрическое отклонение $\sigma_{\lg x}$ рассчитывается по величине частиц 5 % и 95 % вероятности

$$\sigma_{\lg x} = 0,304 \cdot \lg \frac{x_{95\%}}{x_{5\%}}. \quad (2)$$

В пустынях Казахстана на подвижном песке эолового происхождения x_0 изменяется преимущественно в интервале от 90 до 170 мкм, $\sigma_{\lg x}$ – от 0,10 до 0,15, но есть немногочисленные массивы и с более крупными частицами. Сравнительно редко встречаются подвижные пески с нормальной (Гауссовой) функцией распределения частиц по размерам. У закрепленных песков дисперсный состав аппроксимируется логарифмически нормальной функцией распределения по размерам, но $\sigma_{\lg x}$ у них достигает уже 0,2...0,3, т.е. вдвое больше чем у подвижных песков. У них часто наблюдается небольшая положительная асимметрия в концевой части распределения [1, 4, 7].

На осушенном дне Аральского моря наиболее крупный песок приурочен к бывшим островам и прибрежным отмелям, где x_0 достигает здесь 200...390 мкм, а $\sigma_{\lg x}$ возрастает до 0,17...0,27. Новые песчаные массивы, образовавшиеся в результате эоловой переработки донных отложений Арала, сложены из очень мелкого песка со средним геометрическим размером 80...120 мкм и $\sigma_{\lg x}$ менее 0,15. Именно они являлись очагами развития песчано-солевых бурь и источниками аэрозоля, выносимого ветром за их пределы в прошлом столетии [4].

При дальнейшем снижении уровня воды в водоеме к осушенным песчаным и супесчаным грунтам присоединились поверхности, состоящие из алевритовых осадочных пород. Поведение такого мелкого аэрозоля в

районе Арала совершенно не изучено. Неизвестен его элементный и ионный состав, содержание в атмосферных потоках, влияние на рассеяние и изменение спектрального состава солнечного излучения и на радиационный баланс. Известно только, что алевриты состоят преимущественно из минеральных зерен (кварц, полевой шпат, слюда и др.) размером 0,005...0,1 мм (5...100 мкм), но детальная информация о функции распределения их частиц по размерам отсутствует.

Алевритовые породы должны так же легко подвергаться выдуванию, как и песчаные, так как они содержат в своем составе те же наиболее легко перемещаемые ветром частицы размером 70...100 мкм. Наличие в них более мелких частиц размером 5...50 мкм приводит к формированию более длинных шлейфов выносов аэрозолей из-за большей продолжительности жизни этих частиц в атмосфере.

Основным параметром полидисперсного песка, определяющим физические процессы его взаимодействия с воздушным потоком, является средний геометрический размер частиц x_0 . Влияние дисперсии распределения сказывается на том, что реальные процессы ветрового переноса частиц твердой фазы (почвы, песка, солей) имеют не детерминированный, а статистический характер. Поэтому получаемые экспериментальные зависимости также имеют довольно значительные дисперсии и требуют вероятностного подхода к их описанию.

Многолетние градиентные исследования во время бурь выполнялись автором на метеорологических мачтах над подвижным песком 15 экспедициями, которые работали в Южном Прибалхашье и на осушенном дне Аральского моря (рис. 1). Измерения проведены над песками различной крупности, как над ровными спланированными поверхностями, так и в условиях сложного рельефа – над барханами высотой от 0,5 до 1,5 м. Средний геометрический размер частиц песка x_0 в различные годы в местах проведения экспедиций изменялся от 78 до 270 мкм, σ_{lgx} – от 0,09 до 0,15.

На 16-метровых метеорологических мачтах на высотах 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 9 и 16 м проводились измерения средней за 10 минут скорости ветра импульсными анемометрами. На этих же уровнях измерялась переносимая ветром масса песка уловителями Семенова (рис. 2), конструкция которых позволяет применять их для градиентных исследований на мачтах. Случайные погрешности измерения уловленной пескоуловителями массы песка во время бурь на уровне 0,25 м с вероятностью $p = 0,84$ не превышали

15 %, с $p = 0,95$ были меньше 20 % и с $p = 0,99$ – менее 25 %, среднее значение погрешности $\varepsilon_{50\%} = 9,3$ %. На высотах 9 и 16 метров случайные погрешности измерений оказались значительно меньше, чем около поверхности песка. На уровне 9 метров – $\varepsilon_{50\%} = 5$ %, а на высоте 16 метров – $\varepsilon_{50\%} = 3,8$ %. Это указывает на лучшую однородность потока частиц на больших высотах вследствие их турбулентного перемешивания. Исследования процесса улавливания частиц в аэродинамической трубе позволили определить значения систематических погрешностей пескоуловителей, которые лежат в зависимости от скорости потока в интервале 0,6...2 % [8].



Рис. 1. Передвижная метеорологическая станция с градиентным шестнадцатиметровыми мачтами на осушенном дне Арала.



Рис. 2. Пескоуловитель для градиентных измерений переноса массы песка на метеорологических мачтах.

Рассмотрим результаты исследований ветрового переноса массы песка в приземном слое атмосферы высотой h , полученные экспедициями. Ранее мы изучали эту проблему на меньшем объеме измерений 6-ти экспедиций в Приарале и ограничивали определение массы песка в слое переноса 16-ю метрами [4]. На рис. 3 и 4 приведены результаты измерений твердого расхода массы песка $q(z)$, полученные при различных скоростях ветра и над песками различной крупности. Твердым расходом (следуя работе [5]) будем называть массу частиц твердой фазы (песок, соли, пыль), переносимую в единицу времени через единичную площадь сечения потока. Размерность твердого расхода $M \cdot L^{-2} \cdot T^{-1}$ единица твердого расхода в СИ – $кг \cdot м^{-2} \cdot с^{-1}$. Твердый расход связан с массовой концентрацией зависимостью

$$q_z = c_z u_p, \quad (3)$$

Здесь q_z – твердый расход песка на высоте, z ; c_z – массовая концентрация на той же высоте; u_p – скорость частиц твердой фазы в воздушном потоке. Размерность массовой концентрации $M \cdot L^{-3}$, единица в СИ – $кг \cdot м^{-3}$. Чаще для измерений массовой концентрации используют производные единицы – $мг \cdot м^{-3}$ или $мкг \cdot м^{-3}$. Более удобной величиной при определении масс песка или других аэрозолей, перемещаемых воздушными потоками, является твердый расход.

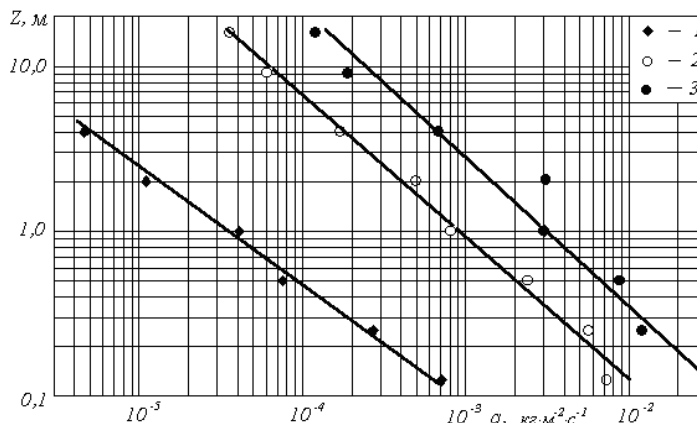


Рис. 3. Профили твердого расхода во время бурь различной интенсивности над песчаной поверхностью с $x_0 = 100 \dots 120$ мкм и $\sigma_{lg x} = 0,12$; 1 – $u_* = 0,40$ м/с; 2 – $u_* = 0,60$ м/с; 3 – $u_* = 0,74$ м/с.

Измеренные во время бурь профили твердого расхода массы песка аппроксимируются степенной функцией вида

$$q(z) = q_1 (z / z_1)^{-\alpha}, \quad (4)$$

где q_1 – твердый расход массы песка на высоте z_1 ; α – показатель степени профиля, определяющий наклон линии зависимости $q(z)$ в координатах $\lg z$ и $\lg q$.

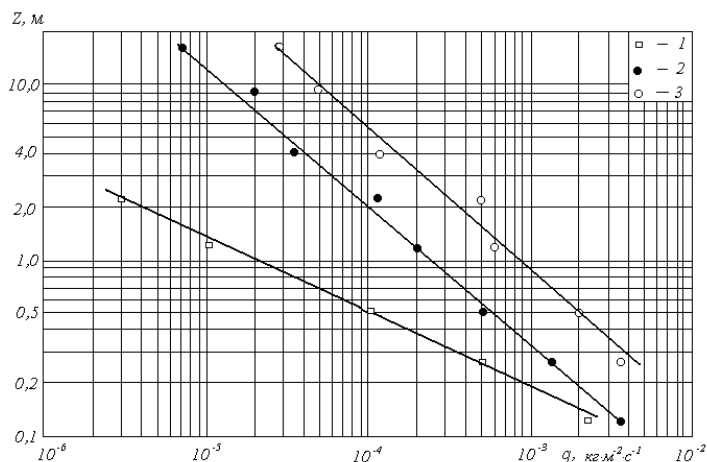


Рис. 4. Профили твердого расхода песка во время бурь над песками различной крупности при одинаковой динамической скорости потока $u_* = 0,4$ м/с. Значения x_0 : 1 – 220 мкм, 2 – 100 мкм, 3 – 78 мкм.

Отклонение экспериментальной точки на высоте два метра на крайнем правом профиле твердого расхода песка (рис. 3) весьма типично при больших скоростях ветра. Оно вызвано попаданием струи песка с гребня ближайшего бархана, которая не успевает рассеиваться в турбулентном потоке на этом расстоянии. Такие отклонения в профиле твердого расхода могут наблюдаться в интервале высот от 0,5 до 4 м в зависимости от высоты бархана, его расстояния от мачты с приборами и скорости ветра. Чаще всего эти погрешности измерений отмечаются на одном уровне, реже – на двух.

Рис. 4 иллюстрирует влияние размеров частиц песка на высоту их переноса. Все три профиля расхода песка получены при одинаковой динамической скорости потока $u_* = 0,40$ м/с над песчаными поверхностями с различным размером частиц. Измерения выполнены в условиях слабых песчаных бурь. Хорошо видно, что над крупным песком перенос идет в основном ниже двух метров ($q_2 = 4 \cdot 10^{-6}$ кг·м²·с⁻¹), тогда как над мелким песком аналогичные расходы массы наблюдаются на высотах 20...30 м. Измерения профилей расхода песка над песчаными поверхностями с различным размером частиц в условиях бурь различной интенсивности, позволили определить зависимость показателя степени α в формуле (4).

Оказалось, что он является линейной функцией отношения гидродинамической крупности частиц среднего геометрического размера ω_g (скорости их свободного падения) к динамической скорости потока u_*

$$\alpha = 0,57 \cdot \omega_g / u_* . \quad (5)$$

Полученный результат качественно подтвердил предсказанный теоретически Г.И. Баренблаттом и Г.С. Голицыным вид зависимости $\alpha = f(\omega_g / u_*)$ [2, 15]. Таким образом, профили твердого расхода массы песка во время песчаных бурь можно описать в приземном слое атмосферы формулой

$$q(z) = q_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^{-0,57 \frac{\omega_g}{u_*}} , \quad (6)$$

где ω_g определялась нами для среднего геометрического размера частиц песка на поверхности x_0 . Это избавило нас от неопределенности выбора ω_g в связи с изменением дисперсного состава песка с высотой переноса [4].

Другой важной характеристикой ветропесчаного потока является общий расход Q_z . Им называется масса частиц твердой фазы, переносимая в единицу времени через нормально ориентированную относительно потока поверхность, ограниченную полосой фронта переноса шириной 1 м и высотой z . Общий расход рассчитывается путем интегрирования профилей твердого расхода по высоте переноса z

$$Q_z = \int_0^z q(z) dz . \quad (7)$$

Размерность общего расхода – $M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}$, единица в СИ – $кг \cdot м^{-1} \cdot с^{-1}$. Величина Q_z называется полным расходом двухфазного потока, если верхняя граница интегрирования в равенстве (7) равна максимальной высоте подъема частиц твердой фазы воздушным потоком. Интегрирование по формуле (7) встречает большие трудности вследствие неопределенности вида функции $q(z)$ в тонком приповерхностном (пограничном) слое ветропесчаного потока.

Для мелкого песка ($x_0 < 120$ мкм) интеграл (7) был представлен в виде суммы двух интегралов $Q_z = \int_0^{z_1} q_z dz + \int_{z_1}^h q_z dz$. Первый из них учитывает общий расход в пограничном слое ветропесчаного потока, второй – в при-

земном слое атмосферы высотой h . Высота приземного слоя атмосферы h зависит от скорости ветра и изменяется при бурях в пределах от двух – трех десятков до 150 метров. Подынтегральная функция первого интеграла была принята не меняющейся с высотой переноса песка и равной твердому расходу песка на высоте $z_1 = 1$ см. Второй интеграл вычислялся от z_1 до h с использованием подынтегральной функции вида $q(z) = q_1(z/z_1)^{-\alpha}$.

Расчеты общего расхода песка по этой схеме в слое переноса 0...5 см дали хорошую сходимость с его экспериментальными измерениями на песке с $x_0 = 90$ мкм и $\sigma_{lgx} = 0,11$.

Поэтому этот метод интегрирования затем был использован при определении Q_z по результатам измерений твердого расхода мелкого песка на осушенной части дна Арала.

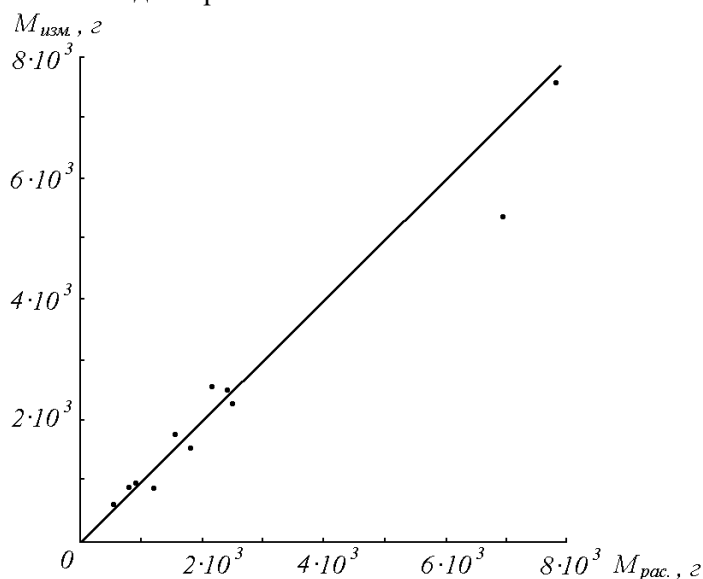


Рис. 5. Сравнение рассчитанной $M_{рас}$ и измеренной $M_{изм}$ масс песка, переносимых в слое 0...5 см.

На крупном песке с $x_0 > 200$ мкм такая схема интегрирования себя не оправдала. Результаты вычисления общего расхода Q_z оказываются сильно завышенными. Очевидно, в предложенной схеме не учитывается отставание летящих крупных частиц песка от потока воздуха, что приводит к завышенным результатам. Для корректного интегрирования профиля твердого расхода над крупным песком необходимы исследования кинема-

тики и динамики пограничного слоя ветропесчаного потока, чтобы получить его аналитическое описание.

Масса песка M в кг/м (или т/км), перенесенного ветром за все время пыльной бури через полосу фронта переноса шириной 1 м и высотой z , может быть получена путем интегрирования по времени t общего (или полного расхода)

$$M = \int_0^{\tau} Q_z(t) dt, \quad (8)$$

где $Q_z(t)$ – функция изменения общего (полного) расхода во времени; t – продолжительность бури, с.

Результаты наших исследований профилей твердого и общего расхода песка показали на ошибочность широко распространенного мнения о том, что при песчаных бурях достаточно измерять Q_z только в слое высотой до 0,5 или 1 м. Оказалось, что только при слабых явлениях переноса над мелким песком Q_z в слое 0...10 м сравнительно незначительно превышает Q_z в слое 0...1 м, (различие достигает 3...5 %). Но при бурях средней и большой интенсивности, когда α в формуле (6) становится менее 1,5, систематические ошибки в определении Q_z достигают уже 10...30 % при ограничении высоты интегрирования одним метром. При очень сильных бурях ($\alpha \leq 1$) интегрирование по высоте даже до 10 м недостаточно и его необходимо продолжать до верхней границы переноса, которой, как показано в работе украинских метеорологов, чаще всего является слой инверсии температуры вблизи границы планетарного пограничного слоя атмосферы [3]. При вычислении Q_z верхней границей интегрирования у нас была принята верхняя граница приземного слоя атмосферы. Она определялась по формуле

$$h = 0,05 k_1 / (z_1 f), \quad (9)$$

где k_1 – коэффициент турбулентности на уровне $z_1 = 1$ м; f – параметр Кориолиса.

Наибольший научный и практический интерес представляет оценка масс частиц, переносимых в различных слоях приземного и планетарного пограничного слоев атмосферы на выходе ветропесчаного потока из источника выноса. В статье автора такие оценки были сделаны для сильной песчаной бури при скоростях ветра 18...20 м/с над песчаным массивом с $x_0 = 120$ мкм [9]. Ниже приводятся полученные расходы массы пес-

ка в различных слоях ветропесчаного потока $Q_{z_1} - Q_{z_2}$, нормированные на значения полного расхода в 1000-и метровом слое переноса $Q_{z=1000}$.

$z_1 - z_2, \text{ м}$	0...10	10...50	50...100	100...200	200...400	400...600	600...800	800...1000
$\frac{Q_{z_1} - Q_{z_2}}{Q_{z=1000}}$	0,808	0,082	0,0298	0,027	0,0246	0,0133	0,009	0,007

Хорошо видно, что наибольшая масса песка переносится в нижней части приземного слоя атмосферы – до 81 % её содержится в слое 0...10 м. Во всей толще приземного слоя, мощность которого достигала во время бури около 150 м, перемещается до 94 % массы песка. На остальную часть пограничного слоя атмосферы приходится 6 % массы песка. Становится ясно, что в дальнем переносе участвует не более 5...6 % от всей перемещаемой ветром массы песка. При более слабых по интенсивности бурях, по сравнению с рассмотренной, доля частиц, участвующих в дальнем переносе, будет ещё меньше [9]. Эти оценки опровергают сложившееся среди многих исследователей пустынь мнение, что достаточно исследовать при ветровом переносе песка только нижний метровый слой ветропесчаного потока. Такие измерения позволительно делать только над крупным песком со средним геометрическим размером свыше 170...180 мкм.

При исследовании общего расхода песка наибольший интерес и практическую значимость имеет поиск его зависимости от скорости ветра и размеров частиц песка. По-видимому, первая попытка получить зависимость Q_z от аналога числа Фруда $Fr_* = u_*^2 / (g \cdot x_0)$, в котором скорость потока u была заменена динамической скоростью u_* (или скоростью трения, как её называют западные исследователи), принадлежит Хсу [16]. Он обобщил имевшиеся к тому времени немногочисленные измерения Q_z над песчаными поверхностями во время бурь и попытался представить их в виде степенной зависимости третьей степени

$$Q_z = k \cdot \left(\frac{u_*}{\sqrt{g \cdot d}} \right)^3,$$

где k – размерный коэффициент пропорциональности, d – размер частиц. У разных авторов, чьи материалы измерений использовал Хсу, k оказался различным. Это указывает на то, что или учет зависимости Q_z от $d^{-3/2}$ неверен, или зависимость носит не детерминированный, а стохастический характер.

Большинство же рассмотренных Хсу зависимостей $Q_z = f(Fr_*)$ представлены в его статье на рисунках в виде идеальных детерминированных. Однако в работе Д. Свасека и Д. Тервиндта, на значительном экспериментальном материале измерений переноса песка, был показан статистический характер зависимости $Q_z = f(u_*)$ [17]. Статистический характер связи объясняется турбулентной структурой потока, полидисперсностью частиц песка, многообразием других природных факторов и их вариацией в атмосфере и поверхностном слое грунта, которые оказывают влияние на интенсивность переноса массы песка. Наиболее важным для северных пустынь, по нашему мнению, является влияние увлажнения верхнего слоя песчаного грунта на интенсивность ветрового переноса его массы [10]. При поиске зависимости обычно используется всего лишь 2...3 параметра, которые не могут описать всё влияние на процесс переноса песка природных факторов, что и приводит к большому их статистическому разбросу.

Первое обобщение наших измерений общего расхода песка экспедициями 1980...1986 гг. при бурях на Арале подтвердило стохастический вид зависимости $Q_z = F(u_*^2 / (g \cdot x_0))$ [4]. Тогда нами была найдена зависимость среднего значения \bar{Q}_z 50-ти процентной обеспеченности от числа Fr_* в слое 0...16 м и дополнена вероятностным описанием возможных отклонений от математического ожидания

$$\bar{Q}_z = 1,8 \cdot 10^{-7} [u_*^2 / (gx_0)]^2. \quad (10)$$

Зависимость общего расхода песка 5 % вероятности имела вид

$$Q_{5\%} = 7,5 \cdot 10^{-7} [u_*^2 / (gx_0)]^2, \quad (11)$$

а 95 % вероятности

$$Q_{95\%} = 3,6 \cdot 10^{-8} [u_*^2 / (gx_0)]^2. \quad (12)$$

Формула 50-ти процентной обеспеченности была рекомендована для климатических исследований переноса масс песка песчаными бурями. На основе (10) выполнена оценка выносимых ветром масс песка и солей с осушенной части дна Арала [4].

Накопление новых результатов измерений при бурях экспедициями 1988...2002 гг., увеличение высоты интегрирования профилей твердого расхода песка до верхней границы приземного слоя атмосферы h позволило нам вновь вернуться к получению более точной зависимости $\bar{Q}_z = f(Fr_*)$. На рис. 6 приведена новая полученная зависимость для об-

щего расхода песка. Данные рис. 6, полученные при отличающихся погодных условиях в различных частях осушившегося дна моря в разные сезоны и годы, достаточно полно отображают то природное многообразие ситуаций, при которых происходит ветровой перенос песка. Очевидно, что измерения Q_z представляют статистический ансамбль. И рис. 6 подтверждает наличие статистической, а не детерминированной зависимости Q_z от динамического числа Фруда, так как одному значению параметра (числу Fr_*) соответствует большое количество значений функции Q_z . Поэтому, необходимо было найти зависимость $\overline{Q_z}$ от числа Fr_* и дополнить ее вероятностным описанием.

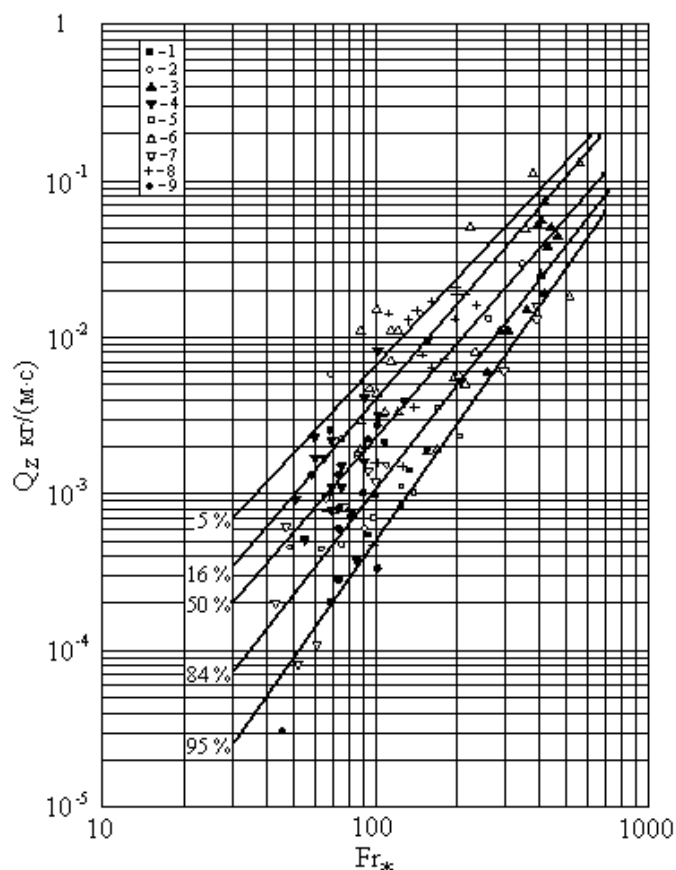


Рис. 6. Зависимость общего расхода песка в приземном слое атмосферы Q_z различной обеспеченности от динамического аналога числа Фруда $Fr_* = u_*^2 / (g \cdot x_0)$. Разными условными знаками обозначены результаты определения Q_z над песками различной крупности x_0 .

Статистическая обработка данных была проведена по схеме, предложенной С.А. Китайгородским при поиске им зависимости $z_0 = f(u_*)$ морской взволнованной поверхности [6]. Вся область значений чисел Fr_* рис. 6, для которых были выполнены определения Q_z , была разбита на восемь интервалов. У каждого интервала вычислены средние значения чисел Фруда \overline{Fr}_{i^*} ($i = 1 \dots 8$). На клетчатке вероятностей для кривых распределения с умеренной асимметричностью, для каждого интервала чисел Фруда, были построены 8 накопленных функций вероятностей Q_z . С кривых распределений были сняты значения общего расхода $Q_{z-p\%}$ обеспеченностью 5, 16, 50, 84 и 95 %. Эти величины наносились на поле рис. 6 для средних значений чисел Фруда \overline{Fr}_{i^*} в соответствующем i – интервале. Затем по этим точкам были проведены зависимости общего расхода заданной обеспеченности $Q_{z-p\%}$. Для зависимостей общего расхода песка заданной обеспеченности от числа Fr_* были получены аналитические выражения

$$Q_{z5\%} = 7,78 \cdot 10^{-7} \left[u_*^2 / (g \cdot x_0) \right]^2; \quad (13)$$

$$Q_{z16\%} = 3,82 \cdot 10^{-7} \left[u_*^2 / (g \cdot x_0) \right]^2; \quad (14)$$

$$\overline{Q}_z = Q_{z50\%} = 2 \cdot 10^{-7} \left[u_*^2 / (g \cdot x_0) \right]^2; \quad (15)$$

$$Q_{z84\%} = 3,02 \cdot 10^{-8} \left[u_*^2 / (g \cdot x_0) \right]^{2,28}; \quad (16)$$

$$Q_{z95\%} = 7,94 \cdot 10^{-9} \left[u_*^2 / (g \cdot x_0) \right]^{2,42}. \quad (17)$$

На рис. 6 проведены все пять степенных зависимостей (13) – (17). Они позволяют получить представление о доверительных интервалах значений общего расхода песка для некоторых заданных вероятностей при массовых расчетах общего расхода песка по значениям числа Fr_* . Для климатических исследований переноса песка ветром следует использовать уравнение 50-ти процентной обеспеченности (15). Все пять эмпирических зависимостей (13) – (17) справедливы для интервала значений чисел Фруда от 25,5 до 700.

Как и следовало ожидать, новые уравнения (13) – (17) отличаются от ранее полученных (10) – (12). Первые три уравнения имеют такой же показатель степени у числа Фруда $Fr_* = u_*^2 / (g \cdot x_0)$, равный 2, но размер-

ные коэффициенты пропорциональности у них возросли на 4...11 %. Увеличение их вполне понятно и ожидалось, так как возросли высоты слоев, в которых определялся общий расход песка Q_z .

Показатель степени уравнений (14) и (15) высокой обеспеченности ($p = 84\%$ и $p = 95\%$) оказались заметно > 2 . Объяснить это можно тем, что эти расходы песка наблюдаются при слабых по интенсивности процессах, определяемых либо ограничением поступления частиц в поток из-за увлажнения поверхности, либо прерывистым характером дефляции при небольших скоростях ветра. По результатам измерений во время бурь пескоуловителями твердый расход рассчитывается по следующей формуле:

$$q_z = \frac{M_z}{F \cdot t}, \quad (18)$$

где M_z – масса песка, уловленного приборами на высоте z , кг; F – площадь приемного отверстия прибора, m^2 ; t – время экспозиции прибора (время осреднения расхода), с. При прерывистом характере процесса дефляции песчаной поверхности время переноса частиц t_p оказывается меньше времени экспозиции приборов t . Это приводит к занижению значений расхода песка и, как следствие, к увеличению показателя степени в уравнениях (16) и (17.)

У большинства западных исследователей, по-видимому, очень велик авторитет Р. Багнольда [14]. Они ищут зависимости горизонтального потока массы песка Q_z только от третьей степени u_* или от скорости ветра u , несколько видоизменяя впервые полученную Р. Багнольдом формулу. В то же время, в советской научной литературе не было такого единого подхода. Так, в теоретической работе Б.А. Шуляка [13] показано, что расход песка Q_z пропорционален четвертой степени динамической скорости u_*^4 и скорости ветра u^4 . Г.И. Баренблатт и Г.С. Голицын [2, 15] указывают, что предельное содержание объемной концентрации потока, несущего очень мелкие частицы, пропорционально u_*^4 . Полученные нами зависимости общего расхода песка также пропорциональны четвертой степени u_* и подтверждают их теоретические выводы. На возможность отличия показателя степени от 3 указывал так же Б.Н. Сенкевич [12].

Работа выполнена при поддержке Комиссии Европейского Союза, контракт №516721 (INCO) – CALTER.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Актуальные проблемы гидрометеорологии озера Балхаш и Прибалхашья. / Под ред. И.И. Скоцеляса – СПб.: Гидрометеоиздат, 1995. – 269 с.
2. Баренблатт Г.И., Голицын Г.С. Локальная структура развитых пыльных бурь. – М.: Изд-во МГУ, 1973. – 44 с.
3. Волеваха В.А., Бабенко В.И., Ганюгина Н.Ф. О состоянии нижней тропосферы во время сильных пыльных бурь на Украине. // Тр. УкрНИГМИ. – 1977. – Вып.160. – С.47 – 58.
4. Гидрометеорологические проблемы Приаралья / Под. ред. Г.Н. Чичасова.– Л.: Гидрометеоиздат, 1990.– 277 с.
5. Дюнин А.К. Механика метелей. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.– 378 с.
6. Китайгородский С.А. Физика взаимодействия атмосферы и океана. – Л.: Гидрометеоиздат, 1970. – 284 с.
7. Семенов О.Е. О распределении почвенных частиц по размерам на юге Казахстана вследствие эоловых процессов // Тр. КазНИГМИ. – 1970. – Вып.36. – С. 153 – 165.
8. Семенов О.Е. О точности измерения расхода песка во время бурь // Гидрометеорология и экология. – 1995. – №3. – С.113 – 125.
9. Семенов О.Е. Моделирование переноса тяжелой быстро оседающей примеси воздушным потоком при бурях // Гидрометеорология и экология. –2006. – №3. – С.15 – 35.
10. Семенов О.Е. О влиянии увлажнения песка на его ветровой перенос. // Гидрометеорология и экология. –2007. – №1. – С. 7 – 28.
11. Семенов О.Е. Экспериментальные исследования кинематики и динамики пыльных бурь и поземков // Тр. КазНИГМИ. – 1972. – Вып.49.– С. 3 – 31.
12. Сенкевич Б.Н. О генезисе основных форм эолового рельефа песчаных пустынь. – Ашхабад, Изд-во «Ылым», 1976. – 183 с.
13. Шуляк Б.А. Физика волн на поверхности сыпучей среды и жидкости. – М.: Наука, 1971.– 400 с.
14. Bagnold R.A. The physics of blown sand and desert dunes. – London: Methuen. 1954. – 265 p.
15. Varenblatt G.I., Golitsyn G.S. Local structure of Matyre Dust Storms // J. of the Atmospheric Sciences. – 1974 – Vol. 31, No 7. – P. 1917 – 1933.

16. Hsu Shih-Ang. Wind Stress Criteria in Eolian Sand Transport. // J. Geoph. Research. – 1971 – Vol. 76, No 36. – P. 8684 – 8686.
17. Svasek J.N., Terwindt J.H.J. Measurements of sand transport by wind on a natural beach // Sedimentology. – 1974. –V.21, №2. – p.311–321.

Қазақстан ғылым академиясының Алматы ғылыми орталығы

**АРАЛ ТҮБІНІҢ ҚҰРҒАҒАН БӨЛІГІНДЕ ҚҰМДЫ ДАУЫЛ
КЕЗІДЕГІ ҚҰМ МАССАЛАРЫНЫҢ ШЫҒЫНЫ ТУРАЛЫ**

Физ.-мат. ғылымд. канд. О.Е. Семенов

Дауыл кезінде атмосфераның жерге жақын қабатындағы құмдардың қатаң шығындарының профильдерін өлшеу нәтижелері талданады. Бұл қабаттағы құмның жалпы шығынының, Фрудтың өлшемсіз санының аналогына тәуелділігі ықтималды түрде берілген: $Fr_* = u_*^2 / (g \cdot x_0)$, мұндағы u_* – динамикалық жылдамдық, g – еркін түсу үдеуі, x_0 – беткейдегі құм бөліктерінің орташа

геометриялық өлшемі. $Q_{z5\%} = 7,78 \cdot 10^{-7} [u_*^2 / (g \cdot x_0)]^2$;
 $Q_{z16\%} = 3,82 \cdot 10^{-7} [u_*^2 / (g \cdot x_0)]^2$; $Q_{z50\%} = 2 \cdot 10^{-7} [u_*^2 / (g \cdot x_0)]^2$;
 $Q_{z84\%} = 3,02 \cdot 10^{-8} [u_*^2 / (g \cdot x_0)]^{2,28}$; $Q_{z95\%} = 7,94 \cdot 10^{-9} [u_*^2 / (g \cdot x_0)]^{2,42}$.

Дауыл кезінде құм массаларының тасымалдануын климаттық есептеу үшін 50 пайыздық қамтамасыздандыру тәуелділігі ұсынылады.