

1. ВВЕДЕНИЕ В УЧЕНИЕ О РЕЧНЫХ НАНОСАХ

1.1. Вводные замечания

Задачей настоящей книги является систематизация основных сведений о речных наносах и способах расчета их движения. Такая систематизация с учетом основных результатов, полученных за последние годы, позволяет трактовать отдельные вопросы проблемы как части единого целого, более глубоко и полно раскрывать ее сущность. Все это будет способствовать внедрению полученных результатов в практику инженерных расчетов.

Прежде чем перейти к изложению основного материала остановимся на определении некоторых терминов, широко используемых в учении о речных наносах.

Наносами называют твердые частицы — продукты разрушения горных пород, почв, органических остатков, переносимые водотоками, течениями в озерах и морях, механически перерабатываемые или сортируемые и частично откладываемые по путям стока и выносимые в области малоподвижной воды, где они оседают. В зависимости от способа транспортирования наносы подразделяют на взвешенные наносы, переносимые течениями во взвешенном состоянии, и влекомые наносы, перемещающиеся в придонном слое потока путем перекачивания, скольжения и сальтации. При изменении скорости течения, глубины и других гидравлических элементов потока меняются условия движения наносов. Частицы, переносившиеся потоком во взвешенном состоянии, могут стать влекомыми наносами, а влекомые — перестать двигаться или перейти во взвешенное состояние; неподвижные же частицы — прийти в движение.

Наносы, формирующие русла рек и ручьев, их поймы, дно озер и водохранилищ, называют донными и отложениями, или, иначе, донными наносами, подразделяемыми соответственно на русловые, пойменные и озерные отложения-наносы. Поверхностный слой русловых, пойменных и озерных отложений, находящихся в активном взаимодействии с потоком, называют активным слоем русла. Русловые и пойменные отложения, составляющие в совокупности речные отложения, называют также речным аллювием.

Количество наносов, проносимое через живое сечение реки в единицу времени, называют расходом наносов; до сих пор его было принято выражать в весовых единицах в секунду. В настоящей книге применяется международная система единиц

СИ, в основе которой лежат единицы массы, длины и времени. Соответственно расход наносов будет выражаться единицами массы в секунду (кг/с). Частное от деления расхода взвешенных наносов на расход воды дает среднюю расходную мутность потока, которая выражается в единицах массы, отнесенной к объему смеси воды с наносами. Обычно эту величину называют просто мутностью потока.

Суммарное количество наносов, переносимое рекой через какой-либо створ (суммарный транспорт наносов) за год, именуют годовым стоком наносов через данный створ. Соответственно можно различать сток взвешенных и сток влекомых наносов. Сток наносов может исчисляться за ряд лет, за сезоны, месяцы и т. д. При отнесении стока наносов к площади водосбора, замыкаемого створом, в котором ведется измерение, получаем модуль стока наносов. Годовой сток наносов может быть выражен и через средний годовой расход наносов. Средняя расходная мутность также рассматривается как параметр стока наносов.

Для оценки мутности водных масс как одной из характеристик качества воды применяется иной показатель мутности, а именно средняя субстанциальная мутность, находящаяся путем осреднения мутности по живому сечению потока без учета скорости течения. Размерность субстанциальной мутности та же, что и средней расходной. Численно эти величины в ряде случаев также близки.

Внесистемные единицы, применяемые в технике и в гидрологии, используются в настоящей книге весьма редко, только при цитировании прежних изданий и притом только тогда, когда по тем или иным соображениям представляется нецелесообразным переводить рассматриваемые величины или формулы в новую систему единиц.

Обобщения по теории речных наносов и методике их расчета делались и ранее. В этой связи следует отметить известные монографии Г. В. Лопатина [93] и Г. И. Шамова [170], изданные соответственно в 1952 и 1959 гг. Первая из этих книг имеет в основном географический аспект; главное внимание в ней уделено природным процессам, обуславливающим сток наносов. Вторая книга отличается большей практической направленностью и, помимо географических обобщений, содержит ряд инженерных методов расчета. Со времени написания этих книг значительно развилась сеть гидрологических наблюдений, удлинились гидрологические ряды; получено много новых материалов, характеризующих режим и распределение по территории параметров стока наносов. Существенное развитие получили теория и методы расчета транспорта наносов, заиления водохранилищ, способы оценки русловых деформаций; создана теория и методика расчета береговых процессов в водохранилищах, разработаны новые методы полевого и лабораторного изучения наносов и мно-

гое другое. Все это выдвигает задачу новой систематизации материала. Отличительной особенностью направления, развиваемого в ГГИ, является его комплексность и доведение теоретических, как гидродинамических, так и физико-географических, разработок до практических методов расчета. В соответствии с этим в настоящей монографии не могли найти достаточно полного освещения те теории и схемы, которые не доведены до практических способов расчета.

По всем рассматриваемым в настоящей книге проблемам даются рекомендации по способам практических расчетов. Эти рекомендации основаны на теоретическом анализе процессов и обобщениях большого натурального материала. Некоторые из этих методов расчета в настоящее время приняты в качестве межведомственных стандартных способов инженерных расчетов (расчеты стока наносов, заиления водохранилищ, транспортирующей способности потоков и т. д.). Другие методы, не являющиеся официально принятыми, тем не менее находят широкое применение в инженерной практике. В монографии приводятся также методы, еще не имеющие широкого распространения и в ряде случаев нуждающиеся в дополнительном натурном или экспериментальном обосновании.

Практическая значимость проблемы речных наносов очень велика. Сведения о них являются одной из важнейших характеристик гидрологического режима рек и склонов их бассейнов. Количество транспортируемых рекой наносов и их режим во многом определяют процессы формирования речного русла, заносимость исходных каналов на реках, режим перекатов и многое другое. Искусственное воздействие на режим речного потока, затрагивающее транспорт наносов, нередко вызывает коренные изменения речного русла и может привести к непредвиденным последствиям. Поэтому любое проектирование гидротехнических сооружений на реках требует учета режима транспорта наносов и учета влияния возводимых сооружений на условия движения твердого материала. Большое практическое значение имеет вопрос о заилении водохранилищ и прудов, определяющем во многих случаях не только продолжительность существования водоема, его эффективность, но и условия его эксплуатации. В настоящее время сток наносов, его внутригодовая и многолетняя изменчивость, крупность наносов являются теми необходимыми исходными данными, которые наряду со сведениями о режиме стока воды используются при проектировании больших и малых водохранилищ. Аналогичные данные применяются и при сооружении отстойников и ирригационных систем.

Сток наносов со склонов является интегральным показателем склоновой эрозии, поэтому данные о наносах необходимы при оценке эрозионных процессов и разработке противозрозионных мероприятий.

При проектировании питьевого, промышленного и сельскохозяйственного водоснабжения (в том числе и орошения) существенное внимание уделяется мутности водных масс, т. е. содержанию в них взвешенных наносов. При превышении соответствующих норм содержания взвешенных веществ в воде проектируются специальные очистные сооружения. Для этих проектов необходимы детальные сведения о наносах.

Наносы в ряде случаев являются полезным сырьем для промышленности, применяются как строительный материал. В донных отложениях рек (в речном аллювии) могут содержаться ценные минералы: алмазы, золото, металлы платиновой группы и т. д. При этом следует иметь в виду два аспекта: первый, когда содержание ценных примесей достаточно велико и аллювий может рассматриваться как россыпи, идущие на промышленную разработку; в другом же случае присутствие в аллювии ценных минералов или сопутствующих им пород позволяет, следуя по путям стока, обнаружить коренные месторождения минералов.

Во всех случаях разработки современных аллювиальных отложений рек должно быть обращено внимание на последствия изъятия материала и на интенсивность его восполнения стоком наносов. Любые нарушения естественного руслового режима, ведущие к «разбалансированию» системы транспорт наносов—русло, вызывают цепную реакцию. Последствия этой реакции должны быть заранее учтены и предусмотрены меры, направленные на предотвращение отрицательных явлений.

1.2. Содержание учения о речных наносах. Историческая справка

Первые серьезные работы по изучению речных наносов относятся к концу XIX и началу XX столетий и связаны с развитием речного судоходства, ирригации, гидротехнического строительства. Начало формирования учения о наносах следует отнести к 20-м годам нашего столетия, т. е. к периоду выделения гидрологии в самостоятельную научную дисциплину.

Учение о речных наносах включает следующие три основных раздела: 1) теория транспорта наносов, 2) методы измерения стока наносов, 3) изучение процессов формирования стока наносов и географического распределения его параметров.

Теория транспорта наносов включает динамические теории взвешивания и влечения, в том числе теорию донно-грядового перемещения наносов, теорию взаимодействия потока и русла, теорию волнового взмучивания и движения наносов на береговых отмелях, методы расчета транспорта наносов в реках, на береговых отмелях, в водохранилищах, методы расчета заиления водохранилищ и прудов и т. п.

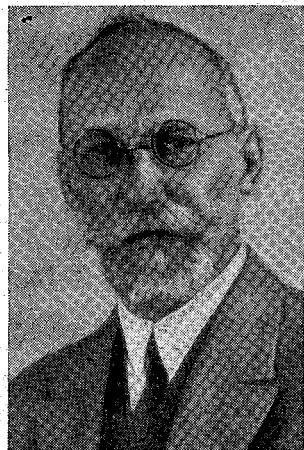
Во втором разделе учения рассматриваются методы полевых сетевых и специальных измерений стока наносов и гранулометрического состава наносов, методы лабораторной обработки проб, а также методы камеральной обработки и способы выражения полученных результатов.

Третья часть учения включает обобщения по режиму стока речных наносов и его изменчивости, по географическому распределению таких величин, как мутность, модуль стока наносов, эрозионные коэффициенты и т. д. Рассматриваются вопросы о распределении гранулометрического состава наносов, о процессах формирования стока наносов на склонах (склоновая эрозия), на водосборах больших и малых рек, в горных странах (в частности, селевые потоки). Важнейшим разделом третьей части учения является методика расчета стока наносов, предусматривающая получение основных его параметров и характеристик их изменчивости.

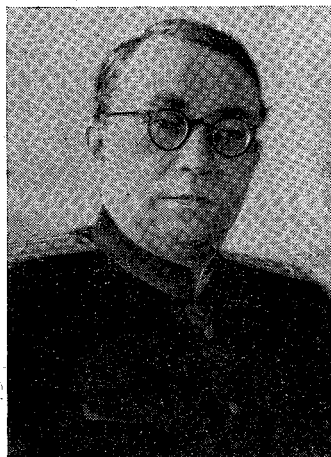
В настоящей книге, как указывалось, излагается первая часть учения о речных наносах, при этом имеется в виду в дальнейшем систематизировать материалы по второй и третьей частям учения о наносах и подготовить специальную монографию, имеющую методический и географический аспект.

Теоретические и лабораторные исследования движения наносов с самого начала велись в двух направлениях: изучение донного влечения наносов и изучение взвешивания частиц и их переноса. Первые работы по исследованию донного влечения выполнены за рубежом в середине XVIII — начале XIX столетий. Исследования А. Брамса в 1753 г., а затем В. Эри были посвящены выяснению условий равновесия и сдвига тяжелой частицы, находящейся на дне потока; Р. Дюбуа в 1879 г. исследовал силу влечения. Первые работы по изучению процессов взвешивания заключались в анализе условий свободного падения частиц в воде (т. е. их гидравлической крупности); здесь следует отметить исследования Д. Стокса (1851 г.), Г. Аллена (1900 г.). Начальные положения теории взвешивания твердых частиц в жидкости рассмотрены в 1911 г. В. В. Глушковым [23], а физически обоснованные модели взвешивания даны в работах В. Шмидта [215] в 1917—1925 гг. и в более законченном виде в работах В. М. Маккавеева [95] в 1931 г. и в последующие годы, а также другими учеными, упоминаемыми ниже.

Остановимся кратко на теоретических работах по изучению транспорта наносов в водных потоках. Основные вопросы, рассматриваемые в теории транспорта наносов водными потоками, следующие: 1) изучение условий воздействия потока на частицу и ее обтекания жидкостью (равновесие частицы на дне, начальная скорость ее сдвига, гидравлическая крупность); 2) исследование перемещения частиц по дну потока, скорости их транспортирования, изучение расхода наносов, связи транспорта наносов с донным рельефом и его формированием; 3) исследование



Глушков Виктор Григорьевич (1883—1939 гг.).



Маккаев Владимир Митрофанович (1896—1970 гг.).

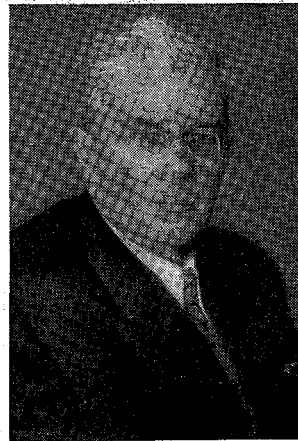
процессов взвешивания твердых частиц турбулентным потоком и их транспорта во взвешенном состоянии.

Все динамические модели влечения и взвешивания наносов требуют знания закономерностей обтекания потоком частиц, поэтому одной из важных составных частей теории транспорта наносов являются те разработки, которые отнесены нами выше к первой группе вопросов. Из прежних работ в этой области заметный след оставили упомянутые выше работы В. Эри и Д. Стокса; формула последнего до настоящего времени широко используется. Важную роль в развитии этого раздела теории транспорта наносов сыграли работы А. Хазена, Р. Ричардса (1908 г.) и особенно отечественных ученых Б. В. Архангельского [6], В. Н. Гончарова [25] и В. В. Романовского [141].

Переходя ко второй группе вопросов, отметим, что после исследований А. Шоклича [216], Г. Энгельса и других ученых проблеме донного влечения стало уделяться чрезвычайно большое внимание, причем появилось очень много публикаций. Существенный вклад в теорию донного влечения наносов и формирования руслового рельефа (гряд и дюн) внесен Ф. Экснером [194], Н. Крамером, В. Н. Гончаровым [25], М. А. Великановым [18], В. Ф. Пушкаревым [63], И. В. Егiazаровым [39], Г. В. Лопатиным [93], Дж. Кеннеди [204], Н. А. Михайловой [113], К. И. Россинским [144], Н. С. Знаменской [46]. Что касается методики расчета транспорта влекомых наносов, то здесь в первую очередь надо отметить вклад, внесенный В. Н. Гончаровым [25], Е. Мейер-Петером и Ф. Мюллером [208], Х. Эйнштейном [191], Г. И. Шамовым [169], И. В. Егiazаровым [40], Г. В. Лопатиным [93].



Шамов Григорий Иванович
(1891—1956 гг.).



Гончаров Виталий Николаевич
(1899—1963 гг.).

Рассматривая третью группу вопросов, касающихся взвешивания и переноса взвешенных наносов турбулентным потоком, напомним, что теоретические работы в этом направлении в России были начаты в 1911 г. В. Г. Глушковым [23], сыгравшим определенную роль в разработке модели взвесенесущего потока. Глушков показал, что поддержание тяжелых частиц в движущейся жидкости происходит за счет вертикальной компоненты пульсационной скорости. Это положение, по существу, является одним из отправных пунктов современной теории взвешивания и транспорта наносов. Основы теории были разработаны в 1915—1925 гг. Дж. Тейлором [228] и В. Шмидтом [215]. В последние годы в литературе указанная теория получила наименование диффузионной теории взвешивания наносов, или полуэмпирической теории. Наиболее полное развитие она получила в 1930—1960 гг. в трудах В. М. Маккавеева [95, 96, 98, 101], который рассмотрел пространственную задачу о турбулентности русловых потоков и составил отвечающие этой задаче общие дифференциальные уравнения турбулентного движения, турбулентной теплопроводности и турбулентной диффузии взвешенных тяжелых частиц. Гравитационное воздействие на частицы учитывается в уравнении параметром, выражающим гидравлическую крупность наносов. Формула этого параметра выводится путем приравнивания силы тяжести, действующей на частицу в воде, величине сопротивления, оказываемого обтекающими ее струями жидкости. Уравнения Маккавеева послужили хорошей основой для дальнейшего развития теории транспорта наносов в русловых потоках и разработки многих практических методов расчета. В этой связи можно сослаться на работы отечественных



Великанов Михаил Андреевич (1879—1964 гг.).



Лопатин Георгий Владимирович (1898—1965 гг.).

авторов: Г. С. Башкирова [8], А. В. Караушева [118, 120, 124, 131]. Из зарубежных исследователей, разрабатывающих ту же теоретическую модель взвешивания наносов, следует упомянуть Т. Кармана и О. Брайена [212], использующих неполное дифференциальное уравнение диффузии. Немало исследований было посвящено экспериментальному изучению взвесенесущего турбулентного потока и, в частности, его придонного слоя. Здесь следует отметить прежде всего работы Н. А. Михайловой; в ее книге [113] приведена обширная библиография по данному вопросу.

Среди многих весьма интересных разработок по теории взвешивания наносов следует указать на исследования М. А. Дементьева [32], а также Г. И. Баренблатта, опирающегося на теорию турбулентности, предложенную А. Н. Колмогоровым [73]. Особо следует выделить исследования взвесенесущего потока, выполненные Ф. И. Франклем [161] и имеющие большое теоретическое значение, но пока еще не нашедшие практического применения.

Теоретическая модель взвешивания и переноса наносов волноприбойным течением на побережьях озер и морей и соответствующие способы расчета рассмотрены в работах Г. С. Башкирова [8], О. Чепы [188], А. В. Караушева [58, 64], А. Я. Шварцман [172, 174] и др.

Параллельно с теоретическими исследованиями наносов велись работы по созданию и совершенствованию методики полевых наблюдений, при этом большой вклад был внесен отечественными учеными В. Г. Глушковым, Б. А. Аполловым, Б. В. Поляковым, Г. И. Шамовым и многими другими. Развивались также

работы и по территориальным обобщениям характеристик стока наносов, анализу условий его формирования и режима. Здесь значительных успехов достигли ученые Советского Союза, ряда социалистических стран, Соединенных Штатов Америки. Особо отметим карты мутности рек, составленные для больших территорий Г. В. Лопатиным, Г. И. Шамовым, Х. Свенсоном, К. Н. Лищицыной и др. Подробно эти вопросы будут рассмотрены в специальной монографии.

1.3. Формирование и состав речных наносов

В результате воздействия на горные породы механических, физических, химических и биологических процессов выветривания образуется крупный и тонкодисперсный обломочный материал, именуемый элювием. Элювиальный покров горных пород образует кору выветривания. Элювий является исходным материалом для образования почв, которые формируются в результате сложных природных процессов и антропогенных факторов.

Мелкий и крупный обломочный материал горных пород, частицы почвы, остатки растительного и животного мира являются исходным продуктом формирования наносов. Целесообразно выделять внешние и внутренние источники питания водотоков наносами. К внешним источникам относится поступление материала со склонов водосборного бассейна, со склонов долины или же из осыпей, непосредственно примыкающих к руслам ручьев и рек. Внутренними источниками питания наносами рек и ручьев являются отложившийся ранее русловой и пойменный аллювий, а также обломочный материал коры выветривания и непосредственно первичные продукты разрушения материнских пород в местах контакта с ними речного потока. В активно действующем потоке постоянно наблюдается обновление речного аллювия: происходит его частичный вынос и замена новым материалом, принесенным с вышерасположенных участков реки или же поступившим сюда непосредственно за счет внешних источников питания. Большинство крупных и средних рек, а также многие малые реки равнинных территорий и предгорий текут в руслах, проложенных в толщах аллювиальных отложений, накопившихся в результате многолетней деятельности самой реки или ее доисторических предшественников, в частности ледниковых потоков. В периоды недостаточного внешнего питания наносами эти отложения питают потоки твердым материалом.

Речные наносы состоят из частиц различных размеров и формы. Форма частицы зависит от ее размера, природы вещества, из которого она состоит, от степени механической обработки в процессе движения, от ее окатанности. Наносы принято делить по размерам частиц на семь основных фракций; большая часть этих фракций подразделяется в свою очередь на две или три подфракции (табл. 1). Определяющим геометрическим раз-

мером частицы является ее средний диаметр d , принимаемый как диаметр эквивалентного частице шара (по объему). Практически обычно пользуются приближенной оценкой величины d , удовлетворяясь данными ситового анализа.

Таблица 1
Классификация частиц наносов по их размерам d мм

Подфракции	Фракции						
	валуны	галька	гравий	песок	пыль	ил	глина
Крупные	больше 100	100—50	10—5	1,0—0,5	0,1—0,05	0,010—0,005	меньше 0,001
Средние		50—20	5—2	0,5—0,2	—	0,005—0,001	
Мелкие		20—10	2—1	0,2—0,1	0,05—0,01	0,005—0,001	

В геологии обломочный материал делится на следующие группы. Крупнообломочные породы — валуны, галька и гравий — образуют группу псефитов. К пескам, именуемым псаммитами, относят частицы размером от 0,05 до 1,0 мм. Пылеватая фракция (0,01—0,1 мм) называется алевритом. Выделяемую в гидрологической классификации фракцию илов в геологии относят к грубодисперсной фракции глины; эти фракции составляют группу пелитов, а собственно глиной считается фракция $d < 0,002$ мм.

Все крупнообломочные фракции (псефиты) образованы из обломков пород, а не из отдельных минералов. Петрографический состав этих обломков полностью определяется составом исходных пород, за счет которых шло их формирование. В составе песков (псаммитов) и пылевой фракции (алефритов) преобладают обломки первичных минералов: кварца, полевых шпатов, карбонатов, слюды; в них содержится также незначительное количество тяжелых минералов (<1%).

В составе грубодисперсной части глин (пелитов) преобладающую роль играют продукты механического разрушения первичных пород: кварца, полевого шпата, роговой обманки, карбонатных пород, слюды, рудных минералов. Тонкодисперсная глина ($d < 0,002$ мм) состоит из продуктов химического распада различных горных пород; в ней преобладают так называемые глинистые минералы, представляющие собой группу водных алюмосиликатов, железистых и марганциальных силикатов. В глинах содержатся активные минералы, обуславливающие характерное свойство глинистых пород — сцепление; к таким минералам относятся каолин, монтмориллонит, гидрослюда. Более подробные сведения о минеральном составе обломочного материала можно найти, например, в книгах Е. М. Сергеева [150], В. Д. Ломтадзе [90] и др.

Свойство сцепления пород самым существенным образом влияет на условия транспортирования частиц потоком. Глинистые породы в ряде случаев могут перемещаться потоком не в виде мелкозернистой взвеси, а в виде агрегатов, которые способны приобретать различную форму, разную степень уплотненности и нередко достигают значительных размеров — порядка нескольких миллиметров. В процессе движения эти агрегаты трансформируются, могут увеличиваться в размерах и в дальнейшем распадаться на мельчайшие зерна породы. Аналогичным образом ведут себя и почвенные агрегаты, попадающие в первичную гидрографическую сеть на склонах и в процессе движения постепенно распадающиеся на составные части — минеральные зерна, минеральные и органические коллоиды, воднорастворимые соли.

Переносимые потоками крупнообломочные частицы горных пород подвергаются механической обработке, обусловленной соударениями частиц, их взаимным трением, ударами и трением о дно потока. В итоге первоначально угловатый обломочный материал окатывается, уменьшаются размеры частиц. Хорошо окатанные частицы гальки, гравия и песка приобретают форму сжатого эллипсоида вращения, при этом обычно чем меньше частицы, тем меньше степень сжатия: частицы песка обычно имеют форму, приближающуюся к шарообразной. В составе речных наносов встречаются и частицы с плохо обтекаемой формой; наиболее характерны в этом отношении пластинки слюды.

Процесс постепенного истирания наносов в реках изучается уже давно. Одной из ранних работ в этом направлении было исследование Штернберга, которое оказалось достаточно удачным и выдержало испытание временем. Штернберг исходит из того, что коэффициент истирания частицы пропорционален скорости ее движения, и в соответствии с этим записывает дифференциальное уравнение истирания. Интегрирование этого уравнения и переход от веса частицы к ее среднему диаметру D позволяет получить следующую формулу истирания наносов на пути их перемещения x :

$$D = D_0 e^{-mx}, \quad (1.1)$$

здесь D_0 — диаметр частицы в начальном створе, где принято $x = 0$. При измерении пути x в метрах численное значение коэффициента m , по-видимому, заключено в пределах $5 \cdot 10^{-6} \leq m \leq 10 \cdot 10^{-6}$. Надо иметь в виду, что m зависит от прочности истираемой породы и от условий транспортирования наносов в потоке. Поэтому целесообразно определять коэффициент m непосредственно в натуральных условиях.

Можно принять другое предположение о коэффициенте истирания частицы, а именно считать его пропорциональным не только скорости движения, но и массе частицы в воде $M(1 - \rho/\rho_s)$, где ρ — плотность воды, а ρ_s — плотность частицы.

Уменьшение массы частицы M за счет истирания определится соотношением

$$M = \frac{M_0}{1 + k_* \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) M_0 x}, \quad (1.2)$$

где k_* — постоянный размерный коэффициент; M_0 — масса частицы при $x = 0$.

Переходя к линейным размерам частиц и объединяя постоянные в один коэффициент k , записываем

$$D = \frac{D_0}{\sqrt[3]{1 + k D_0^3 x}}. \quad (1.3)$$

При выражении x в метрах, а D в миллиметрах численное значение k колеблется в пределах $0,5 \cdot 10^{-10} \leq k \leq 10 \cdot 10^{-10}$. Это уравнение на начальном участке пути дает более интенсивное истирание частиц, чем уравнение Штернберга, а затем значительно более медленное. При определении параметров m и k в приведенных выше формулах и сопоставлении их с натурными данными надо учитывать возможность уменьшения D по x , обусловленную не только истиранием частиц, но и уменьшением уклона потока по длине x .

В реках всегда транспортируются наносы различного размера, поэтому выражение крупности частиц через один их средний размер представляется недостаточным. В гидрологии пользуются гранулометрическими кривыми наносов, получаемыми на основании лабораторных анализов проб грунтов или транспортируемых частиц.

В процессе транспортирования наносов потоками происходит определенная сортировка частиц по крупности. При изменении гидравлических характеристик потока изменяется и крупность транспортируемых им наносов. Эти изменения наиболее резко отражаются на крупных частицах, транспортирование которых при снижении скорости течения ниже определенного предела прекращается. Сортировка никогда не бывает полной, она приводит лишь к сужению спектра крупности частиц; при этом предельные значения размеров частиц, как и их медианное значение, зависят, с одной стороны, от гидравлических параметров потока, а с другой — от состава частиц, имеющих в источниках питания потока наносами. Весьма значительным разнообразием отличается и гранулометрический состав донных отложений речных потоков.

В табл. 2 и на рис. 1 приведены примеры гранулометрического состава речных отложений, характеризующихся широким диапазоном крупности (кривые 1, 2 и 6), и наносов, имеющих сравнительно узкий диапазон крупности (кривые 3—5 и 7).

КАРТА

Таблица 2

Характерные гранулометрические составы речных донных отложений (содержание фракций дано в процентах по массе)

№ п/п	Река — пункт	Диаметр частиц d мм														
		галька			гравий			песок			пыль		ил	глина		
		100-50	50-20	20-10	10-5	5-2	2-1	1-0,5	0,5-0,2	0,2-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,005-0,001	<0,001		
1	Белая — г. Стерлитамак	3,3	33,7	23,5	11,9	7,7	2,8	7,6	5,9	2,8	0,7	0,1				
2	Лугань — д. Владимировка		13,4	11,7	1,5	2,0	1,1	11,7	10,0	8,6	19,6	20,4				
3	Минья — п. Картяня		42,6	13,9	11,6	8,9	10,1	8,3	3,1	1,5						
4	Мокша — г. Темников				0,8	2,2	26,9	54,0	9,7	1,2	5,2					
5	Стырь — г. Луцк				0,7	4,6	20,2	12,6	6,6	34,9	6,6					
6	Неман — д. Мозурай (Каунасское вдхр)				1,8	4,0	5,9	7,8	6,6	14,2	17,8	22,1				13,6
7	Поломь — с. Яжелбицы		13,2	8,9	30,3	19,3	5,2	0,3								

Ленинградский
Гидрометеорологический институт
ФИЗИКА

Донные отложения рек и водохранилищ могут быть типизированы по гранулометрическому составу наносов. От гранулометрического состава отложений зависит их плотность $\rho_{отл}$, выражающая массу твердого вещества (скелета) грунта в единице его объема; она может быть вычислена по формуле

$$\rho_{отл} = \frac{m_{отл}}{V_r}, \quad (1.4)$$

где $m_{отл}$ — масса скелета грунта, занимающего объем V_r .

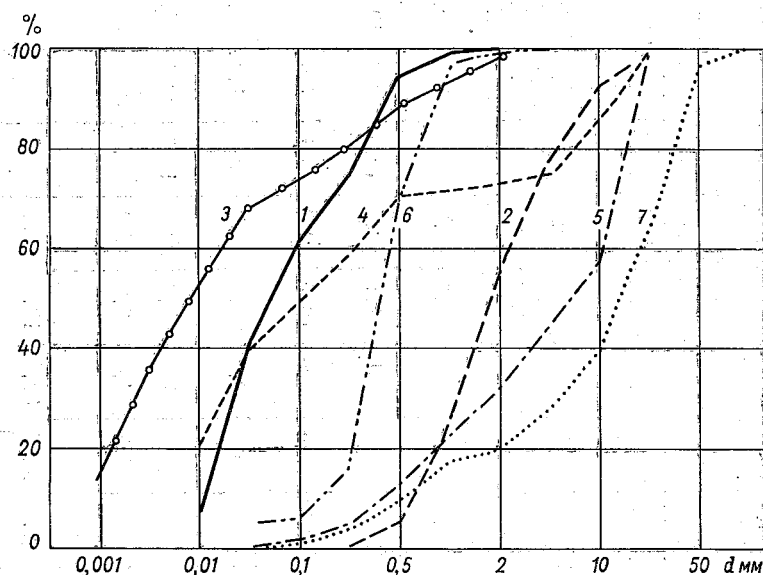


Рис. 1. Интегральные кривые характерных грунтов.

1—7 — номера кривых, соответствующие номерам пунктов по табл. 2.

В табл. 3 дана типизация донных отложений по гранулометрическому составу и характерные для каждого типа грунта значения плотности. В рамках показано характерное содержание фракций (в процентах), входящих в состав данного типа грунта.

Известно, что свежееотложившийся материал имеет меньшую плотность, чем слежавшийся грунт. При составлении табл. 3 предполагалось, что отложения уже достаточно уплотнены. Кроме того, в таблице не учитывается содержание органических веществ. С увеличением содержания органических примесей плотность донных отложений уменьшается. Например, плотность отложений прудов южной части Украины при 5%-ном содержании (по массе высушенного вещества) органических остатков уменьшается на 20—30%, при 10%-ном — на 30—50%. Это соотношение следует учитывать при оценке плотности грунтов.

Таблица 3
 Типы грунтов (донных отложений) и их плотность в зависимости от гранулометрического состава [119]

Типы грунтов (донных отложений)	Диаметр частиц (мм) и пределы их содержания в грунтах (% по массе)											Плотность $\rho_{отл} \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$			
	галька		гравий		песок		пыль		ил		глина				
	100-50	50-20	20-10	10-5	5-2	2-1	1-0,5	0,5-0,2	0,2-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	0,001	
Илы тонкие											10-20	40-70	10-20	0,7-0,8	
Илы										20-40	40-70	40-70	10-20	0,8-0,9	
Илы с примесью песка									10-20	40-70	40-70	10-20	10-20	0,9-1,1	
Мелкие пески заиленные									20-40	40-70	10-20			1,1-1,2	
Мелкие и сред- ние пески, заи- ленные								20-40	40-70	10-20				1,2-1,3	
Средние пески заиленные								40-70	20-40	10-20				1,3-1,5	
Мелкие пески								10-20	40-70	20-40				1,5-1,6	
Средние пески								40-70	20-40	10-20				1,6-1,7	
Средние и круп- ные пески				10-20	40-70	20-40	40-70	20-40	20-40					1,6-1,8	
Пески с гравием				20-40	40-70									1,7-1,9	
Гравий		10-20		40-70	10-20									1,8-2,1	
Галька с гравием	40-70			20-40	10-20									2,0-2,2	

1.4. Транспорт наносов и русловой процесс

Транспорт наносов в речных потоках носит своеобразный и в определенном смысле противоречивый характер. Движение отдельных частиц отличается прерывистостью: они то находятся в движении, перемещаясь во взвешенном или влекомом состоянии, то выпадают на дно потока или же выбрасываются на пойму, образуя на дне русла и на пойме массивы речного аллювия. Взамен утраченных потоком частиц со дна отрываются новые, которые присоединяются к частицам, находящимся в движении, и вместе с ними продолжают путь вниз по течению. Если рассматривать некоторый короткий участок потока или же его сечение, движение мелких наносов представляется непрерывным, поскольку замена одних частиц другими не влияет на общую насыщенность водных масс наносами. В ряде случаев то же можно сказать и о транспорте более крупных частиц — так называемых влекомых наносов. Однако их содержание в потоке в условиях грядового характера поверхности русла может существенно меняться в продольном направлении, при этом транспорт влекомых наносов будет иметь квазипериодический характер. Тем не менее при осреднении за периоды прохождения гряды колебания расхода наносов становятся практически незаметными.

Сущность русловых процессов заключается в образовании русла, его вертикальных и горизонтальных смещениях, изменениях его формы и размеров. В основе этих процессов лежит взаимодействие потока и русла, носящее характер как динамического взаимодействия потока и русла, так и взаимодействия, выражающегося в обмене наносами потока и русла. Такой обмен осуществляется за счет постоянно наблюдающегося осаждения и взмыва наносов и является одной из важнейших форм взаимодействия. Русловые деформации являются проявлением эрозионно-аккумулятивных процессов в русле и пойме реки и связаны с эрозионно-аккумулятивным комплексом процессов, охватывающим весь речной водосбор и представляющим собой в целом систему с характерными для нее прямыми и обратными связями. Поэтому понятна целесообразность системного подхода к изучению руслового процесса.

Процесс формирования и развития русла можно рассматривать как наложение деформаций следующих двух видов: 1 — одноподнаправленные, сводящиеся к врезанию или поднятию русла, изменению его размеров, сохраняющие свою направленность в течение длительного времени (годы, столетия, геологические периоды); 2 — циклические и квазипериодические деформации, характеризующиеся чередованием во времени размывов и намывов, но носящие в каждый рассматриваемый интервал времени характер одноподнаправленного процесса. В зависимости от обуславливающих факторов деформации первого и второго типов ох-

ватывают большие или весьма короткие участки реки; соответственно будем подразделять их на общие и локальные. Общие деформации второго типа связаны с сезонной и многолетней изменчивостью жидкого и твердого стока реки или с подпором от нижерасположенного притока или водоема. Циклические и квазипериодические локальные деформации русла обусловлены перемещением больших и средних русловых форм (побочней, осередков, донных гряд и т. д.), формированием и трансформацией этих образований, переотложением наносов на поймах, смещением меандр и пр. На рис. 2 представлена схема типизации русловых деформаций и указаны их основные факторы.

Формирование русла является саморегулируемым процессом, причем регулирование осуществляется через транспортирующую способность потока, определяемую как параметрами самого потока, так и параметрами переносимых им наносов [58, 66]. Если транспортирующая способность потока не реализована, т. е. имеет место его недогрузка наносами, то в результате взаимобмен наносами потока и русла будет несбалансирован и притом таким образом, что взмыв превысит осаждение. В результате насыщение потока наносами и их расход P_S возрастут по длине рассматриваемого участка реки, на котором будет наблюдаться размыв русла. Размыв приведет к увеличению глубины потока и соответственно к уменьшению скорости течения, а вместе с тем и транспортирующей способности потока $P_{Стр}$. Это вызовет уменьшение интенсивности размыва, и затем при достижении равенства между величинами P_S и $P_{Стр}$ размыв прекратится. При заилении имеет место обратная картина, т. е. обусловленное заилением уменьшение глубины вызовет увеличение скорости течения и транспортирующей способности потока, при этом, когда $P_{Стр}$ достигнет значения фактического расхода наносов P_S , заиление прекратится.

В зависимости от состояния потока и русла, их основных характеристик (продольного уклона, расхода воды, глубины, гранулометрического состава донных отложений и т. д.), а также от режима жидкого и твердого стока интенсивность русловых деформаций и время, необходимое для затухания деформаций при данном состоянии реки, оказываются различными. Это время для весьма малых водотоков может быть очень коротким, для рек оно может выражаться продолжительностью паводка или его части (здесь надо напомнить о своеобразии режима некоторых перекаатов), наконец, во многих случаях процесс затухания деформаций протекает весьма продолжительное время, измеряемое годами, десятилетиями и геологическими периодами. Время выравнивания транспортирующей способности потока и фактического расхода наносов, происходящего в результате саморегулирования русла, будем называть временем стабилизации.

При анализе условий переноса рекой наносов весьма полезно установить (если для этого достаточно данных) динамический

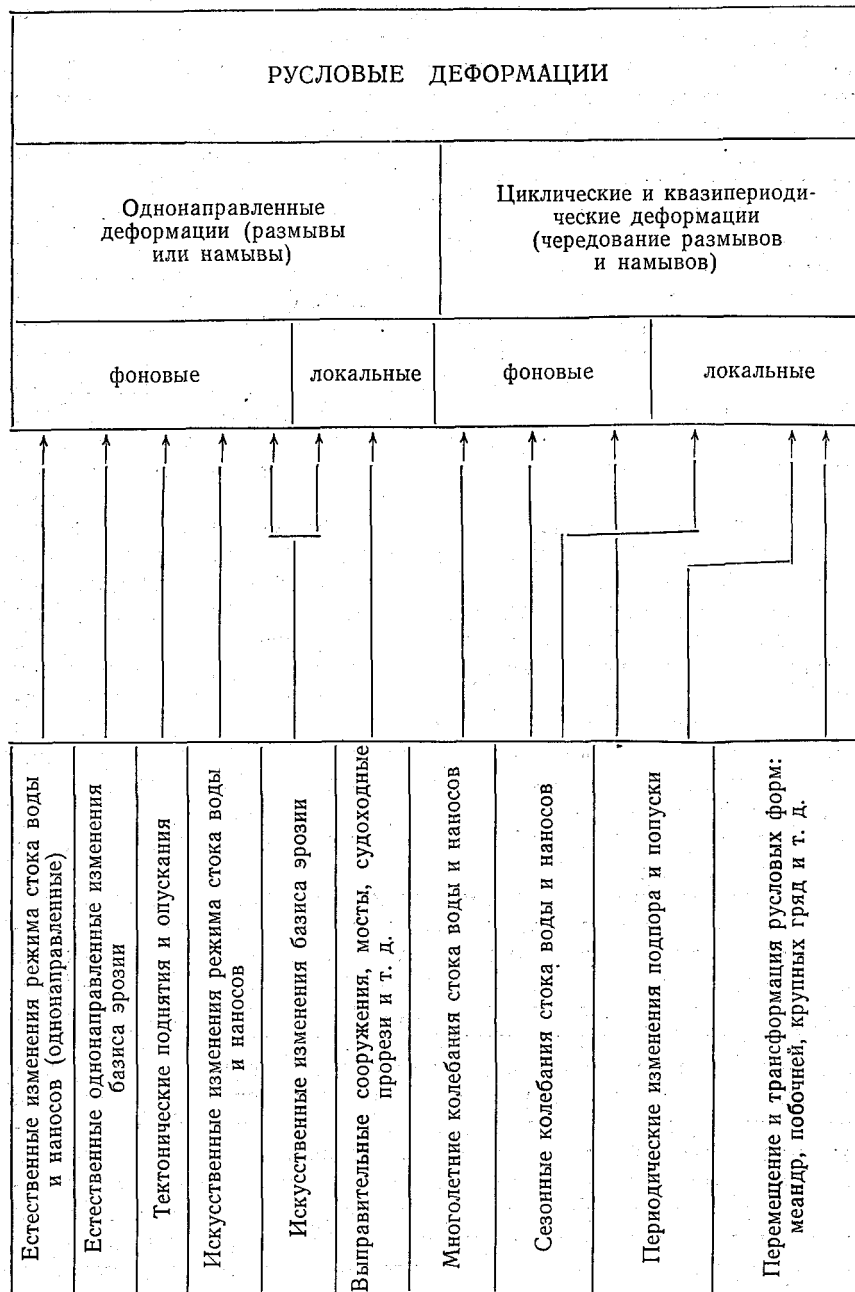


Рис. 2: Основные виды и факторы русловых деформаций.

тип русла. Динамическая классификация построена на учете направленности фоновой деформации русла [66]. Согласно этой классификации русла делятся на три типа, которые в свою очередь подразделяются на группы в зависимости от особенностей процесса. Основным критерием, применяемым в классификации, является общая направленность процесса: размыв, заиление, динамически устойчивое состояние. Эти данные могут быть получены по материалам многолетних русловых наблюдений на больших участках рек. Направленность руслового процесса определяется соотношением фактического расхода наносов P_s и транспортирующей способности потока $P_{стр}$.

Обе эти величины оцениваются при так называемом руслоформирующем расходе воды, т. е. расходе, отвечающем малой обеспеченности, порядка 5—10%. По определению Н. А. Ржаницына [138], руслоформирующий расход — это такой расход воды, эффект которого тождествен суммарному руслоформирующему действию всего годового гидрографа.

Рассматриваемая ниже классификация русел применяется к отдельным достаточно большим участкам рек, характеризующимся одинаковой направленностью и интенсивностью процесса.

К типу I относятся эрозионные русла; для потоков, протекающих в них, характерен дефицит наносов ($P_s < P_{стр}$). Русла типа I делятся на две группы: 1) эрозионноустойчивые русла, сложенные в прочных (скальных) породах; и 2) размываемые русла, сформированные размываемыми грунтами. Для первой группы характерно весьма медленное насыщение потока наносами по его длине, даже при очень большом дефиците наносов. Потоки второй группы насыщаются на коротких расстояниях.

К типу II принадлежат заиляемые (заносимые) русла, формирующиеся при перегрузке потока наносами ($P_s > P_{стр}$); в процессе отложения перегрузка наносами вдоль потока уменьшается, что является следствием уменьшения величины P_s .

Тип III — динамически устойчивые русла, сложенные подвижными аллювиальными отложениями, но не подвергающиеся однонаправленным деформациям (врезу или намыву) или деформируемые весьма слабо. Русла этого типа подразделяются на две группы: 1) равновесные русла, совершенно не подвергающиеся врезам или намыву ($P_s = P_{стр}$), и 2) квазиустойчивые русла, развивающиеся в условиях лишь приближенного соответствия между величинами P_s и $P_{стр}$. Здесь тенденция общего врезания русла или аккумуляции наносов на больших участках реки проявляется крайне медленно, хотя и сохраняет определенную направленность. Рассматриваемая группа может быть подразделена на две подгруппы: а) квазиустойчивые русла с тенденцией к врезанию и б) квазиустойчивые русла с тенденцией к намыву. В частности, к последним могут быть отнесены не-

которые участки русел в предгорьях со сравнительно слабо выраженным процессом аккумуляции.

Данная классификация русел основана на учете общей направленности русловых деформаций, рассматриваемых как конкретное проявление эрозионно-аккумулятивных процессов на поверхности суши, обусловленных стоком воды. На фоне общих деформаций рассмотренных типов (за исключением, пожалуй, только русел первой группы типа 1) развиваются квазипериодические и циклические деформации, в том числе и локальные обратимые деформации, обусловленные перемещением и трансформацией русловых форм (гряд, побочней, осередков и т. д.).

Для рек, протекающих в руслах разных типов, характерны различные особенности формирования донных отложений. В основе этого процесса всегда лежит взаимодействие потока и русла. В составе донных отложений эрозионных русел существенную роль играет местный материал размыва тех пород, в которые врезается поток. К этому материалу добавляются наносы, принесенные потоком с вышерасположенных участков реки и с поверхности ее бассейна. При интенсивном врезании потока на поверхности русла образуется так называемая отмостка, сложенная слоем крупного материала, оставшегося на месте вследствие его малой транспортабельности после вымыва из грунта мелких наносов. Отмостка уменьшает интенсивность дальнейшего врезания русла. Состав донных отложений в заиляемых (заносимых) руслах определяется составом приносимых потоком частиц. Донные отложения динамически устойчивых русел формируются за счет транспортируемых потоком наносов в результате сложных процессов сортировки частиц, являющейся также одним из проявлений взаимодействия потока и русла.

1.5. Теория транспорта наносов и речная гидравлика

Теорию транспорта наносов можно рассматривать как составную часть речной гидравлики. При выполнении расчетов движения и переотложения наносов используются многие методы и формулы речной гидравлики. Режим речного потока можно характеризовать как неустановившийся: изменяются расходы воды, уровни, скорости течения. Особенностью рек является также изменчивость скорости по длине потока, т. е. неравномерность течения. Это обусловлено изменениями размеров и формы поперечного сечения речного русла по его длине, наличием притоков, островов, протоков, различных донно-грядовых образований, закруглений русла и т. д.

Течение в речных потоках всегда является турбулентным, при этом особую роль как в динамике потока, так и в формировании русловых структур играют крупномасштабные турбулентные образования. Наблюдения показывают, что распределение турбу-

лентных пульсаций скоростей в отдельных точках потока даже и на весьма близких к поверхности русла расстояниях с определенным приближением может быть аппроксимировано законом равной вероятности. Это облегчает решение многих практических задач, не требующих высокой точности, которая, впрочем, вряд ли вообще достижима при расчете речных потоков и тем более транспорта наносов.

Течения в ручьях в большинстве случаев, так же как и в реках, турбулентны. По-видимому, лишь на склонах в самых малых ручьях эфемерной микроручейковой сети может наблюдаться так называемый переходный режим, а в некоторых редких случаях даже и ламинарный режим течения.

При изучении речных потоков уделяется внимание как мгновенным пульсирующим скоростям, так и полю осредненных скоростей и их компонентов. Поле осредненных скоростей течения определяет направленный перенос водных масс, что в свою очередь характеризует направление и интенсивность переноса наносов в русловом потоке.

Осредненные скорости в реках изменяются во всех координатных направлениях; особенно велики при этом градиенты скорости по вертикали, несколько меньше они по ширине потока и, как правило, очень малы по его длине.

Одной из особенностей движения воды в реках является непараллельноструйность течения, проявляющаяся наиболее ярко на закруглениях потока, но наблюдающаяся и на других его участках. Из условия неразрывности движения жидкости вытекает обязательное условие замкнутости поперечных течений при медленно изменяющемся во времени режиме потока. Поэтому поперечные течения нередко называют поперечными циркуляциями. Они играют большую роль в переносе наносов и в русловых процессах.

Инженерные сооружения, возводимые на реках, оказывают существенное влияние на их режим, а в некоторых случаях коренным образом изменяют его, подчиняя определенным хозяйственным целям. При проектировании таких сооружений, как и вообще при планировании использования водных объектов, большое внимание необходимо уделять проблеме наносов и русла, оценивая заранее все последствия, к которым приведут искусственные изменения режима реки.

Режим наносов, их перемещение в потоках, взаимодействие текущей воды и русла в весьма большой мере зависят от гидравлических элементов потока: от значения и распределения скоростей, от характеристик турбулентности потока. В связи с этим любым расчетам транспорта наносов предшествуют соответствующие гидравлические расчеты. При разработке теории и методики расчета движения наносов также используются многие положения гидравлики. В последующем изложении гидравлические методы расчета не приводятся — они детально

рассмотрены в монографиях Н. М. Бернадского [10], А. В. Караушева [64], Н. А. Ржаницына [137] и др.

Выше уже указывалось, что в настоящей книге за основу принята международная система единиц СИ. В речной же гидравлике и во многих работах по транспорту наносов до сих пор применялись так называемые внесистемные единицы, причем за основу бралась единица силы, а не массы. Размерности основных гидравлических параметров в старых единицах и в новой системе (СИ) приведены в табл. 4.

Таблица 4

Единицы измерения основных гидравлических параметров

Обозначения: т*, кг*, г* — соответственно тонна, килограмм, грамм как единицы силы — веса

Величина	Обозначение	Единицы	
		СИ	технической системы и внесистемные
Плотность	ρ	кг/м ³	т* с ² /м ⁴
Удельный вес	γ	Н/м ³	т*/м ³
Динамическая вязкость	μ, A	Па·с; Нс/м ²	т* с/м ²
Кинематическая вязкость	$\nu, \frac{A}{\rho}$	м ² /с	м ² /с
Сила	F, P	Н	т*
Касательное напряжение	τ	Н/м ²	т*/м ²
Расход воды	Q	м ³ /с	м ³ /с
Концентрация вещества, мутность	S	г/м ³	г*/м ³
Транспортирующая способность потока, расход наносов	P_S	кг/м ³ кг/с	кг*/м ³ кг*/с
Коэффициент Шези	C	$\frac{1}{\text{м}^2/\text{с}}$	$\frac{1}{\text{м}^2/\text{с}}$
Волновая энергия (на 1 м ²)	E	Н/м; Дж/м ²	т*/м

В гидравлике широко используются коэффициенты вязкости жидкости: динамический μ и кинематический ν ; последний выражается соотношением $\nu = \mu/\rho$, где ρ — плотность жидкости в кг/м³ (кг — единица массы). Величина ν имеет размерность м²/с.

Вопросы теории и методики расчета транспорта наносов в речной гидравлике решаются преимущественно на основе так называемой полуэмпирической теории турбулентности, которую правильнее было бы назвать динамической теорией турбулентности. Одним из главных параметров в этой теории является коэффициент турбулентной вязкости A , называемый также коэффициентом турбулентного обмена, или коэффициентом виртуальной вязкости. Размерности A те же, что и μ (Нс/м²). Кине-

матический коэффициент виртуальной вязкости совпадает с коэффициентом турбулентной диффузии, который выражается дробью A/ρ . Эта величина играет большую роль в современной теории транспорта наносов.

Исследованиями установлено, что коэффициент турбулентной вязкости A зависит от параметров потока и шероховатости русла и в общем случае изменяется в координатных направлениях в связи с изменением указанных величин. В частности, хорошо прослеживается изменение A по вертикали руслового потока. Достаточно удовлетворительный результат дает следующая полуэмпирическая формула, выражающая распределение A по вертикали:

$$A = \frac{g\rho H v}{MC}. \quad (1.5)$$

Размерность A в системе СИ $\text{нс}/\text{м}^2$ (табл. 4). В этой формуле ρ — плотность жидкости; g — ускорение свободного падения; H — глубина потока; $v = v(y)$ — скорость течения, изменяющаяся по вертикальной координате y . Кроме того, в формуле (1.5) содержится коэффициент Шези C и зависящий от него параметр M ; величины C и M имеют размерность $\text{м}^{1/2}/\text{с}$.

При решении многих задач о наносах вполне приемлемым оказывается использование среднего значения $A_{\text{ср}}$, вычисляемого по средней на вертикали, в сечении или на участке потока скорости $v_{\text{ср}}$ и по средней глубине H . Для $A_{\text{ср}}$ применяется формула

$$A_{\text{ср}} = \frac{g\rho H v_{\text{ср}}}{MC}. \quad (1.6)$$

Входящие сюда величины M и C также берутся как средние соответственно в сечении или на участке потока.