

О РЕЦЕНЗИИ В.М. КАТОЛИКОВА НА СТАТЬЮ «ТРАНСПОРТИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ РЕЧНОГО ПОТОКА»

М.В. Шмакова

ИНОЗ РАН, m-shmakova@yandex.ru

Обсуждаются закономерности сопряжения гидравлических переменных состояния речного потока и полученная новая формула транспортирующей способности потока, представленные в статье М.В. Шмаковой, С.А. Кондратьева «Транспортирующая способность речного потока». Авторами вводятся новые понятия «фазовое гидравлическое пространство» и «транспортирующий потенциал потока». Рецензентом этой статьи В.М. Католиковым неверно понимаются как базовые для речной гидравлики вопросы, так и смысл математических преобразований, предваряющих вывод полученных гидравлических соотношений.

Ключевые слова: гидравлические характеристики потока, скорость потока, расход наносов, гидравлический режим.

ABOUT THE REVIEW OF THE ARTICLE «TRANSPORTING CAPACITY OF THE RIVER FLOW»

M.V. Shmakova

Institute of Limnology RAS

The regularities of conjugation of hydraulic variables of the state of the river flow and the obtained new formula for the transporting ability of the stream, presented in the article by M.V. Shmakova, S.A. Kondratiev “The transporting ability of the river flow” The authors introduce new concepts of “phase hydraulic space” and “transporting flow potential”. The reviewer of this article (V.M. Katolikov) incorrectly understood a base for river hydraulics issues and the meaning of mathematical transformations that precede output the hydraulic ratios.

Keywords: hydraulic flow characteristics, flow rate, sediment flow rate, hydraulic mode.

Настоящая статья представляет собой ответ на рецензию В.М. Католикова [1], опубликованную в журнале Ученые записки РГГМУ № 56 (2019 г.), на статью авторов [6].

1. Замечание по определению транспортирующей способности потока

В этом замечании можно выделить два ключевых момента — терминологический и смысловой (применительно к существу статьи).

Терминологический. К концу прошлого века единого строгого определения транспортирующей способности потока не было. Разными исследователями приводились различные модификации этого определения, при этом вольной трактовки такового, конечно, не наблюдалось. Все определения так или иначе определяют

транспортирующую способность потока как максимальный расход наносов, который способен перенести речной поток. Например, «при гидродинамическом подходе к изучению руслового процесса под транспортирующей способностью потока понимается расход наносов G , соответствующий заданному расходу воды Q в русле заданного поперечного сечения при заданном продольном уклоне и заданном составе донных отложений» [3]. При этом приведенное в [1] определение К.В. Гришанина «*транспортирующая способность потока — это предельный расход наносов при заданных гидравлических характеристиках потока (скорости и глубине), а не при заданном расходе воды*» В.М. Католиковым в его рецензии трактуется недостаточно полно. Под потоком в данном контексте подразумевается определенный расход воды, что следует из приведенного выше определения из работы Н.Е. Кондратьева [3]. В противном случае такая трактовка теряет свой физический смысл: расход наносов будет возрастать с увеличением расхода воды, а расход воды может увеличиваться до самых немыслимых значений. В этом случае (в понимании В.М. Католикова) транспортирующая способность потока должна быть однозначно сопряжена с максимальным расходом воды.

Смысловой. Одно из основных приведенных в статье понятий — это фазовое гидравлическое пространство. Фазовое гидравлическое пространство представляет собой набор физически возможных сочетаний гидравлических переменных состояния потока (глубины и скорости) при фиксированном расходе воды, которым соответствуют те или иные значения расхода наносов. Это и замечает в своей рецензии В.М. Католиков, ссылаясь на Гидрологический словарь А.И. Чеботарева [5]: «*Транспортирующая способность потока — это предельный расход наносов, который способен транспортировать поток при заданных гидравлических характеристиках потока: уклоне, скорости, глубине*» [1]. Однако рецензент не смог скоординировать эти два идентичных положения. Это проиллюстрировано и в комментарии рецензента В.М. Католикова: «*Ключевой идеей статьи является понятие «транспортирующая способность потока»*» [1]. В действительности ключевой идеей статьи является транспортирующий потенциал потока. На этом понятии построено определение фазового гидравлического пространства и последующий вывод аналитической формулы транспортирующей способности потока. К сожалению, рецензент не заметил различия между понятиями «транспортирующая способность» и «транспортирующий потенциал».

Тем не менее приведенное В.М. Католиковым определение транспортирующей способности потока хорошо соотносится с определением, приведенным в рецензируемой им статье, и помогает раскрыть такое понятие, как «транспортирующий потенциал потока» — масса твердого вещества, которую может переносить фиксированный расход воды при заданном сопряжении глубины и скорости. При изменении этого сопряжения меняется и транспортирующий потенциал. При определенных условиях он (потенциал) может соответствовать транспортирующей способности потока (максимальному расходу наносов). Или — при ином сопряжении — поток может быть минимально нагружен наносами. Цель статьи [6] — анализ этого сопряжения на основании теоретических положений и качественных данных наблюдений.

На понятии транспортирующего потенциала удобно строить расчеты перестроения дна речных потоков в несопряженных математических моделях [8]. В этих расчетах сопоставляются расход наносов, который способен перенести поток при данных глубине и скорости потока (потенциал), и расход наносов, поступивший в расчетный створ с верхнего створа. Если поступило больше, то имеет место осаждение, иначе — размыв.

И последнее замечание по рассматриваемому пункту из рецензии В.М. Католикова: «...с точки зрения авторов один и тот же предельный расход наносов может быть при различных сочетаниях глубины и скорости, в то время как классическая трактовка термина «транспортирующая способность потока» этого не допускает» [1]. Здесь вновь уместно сослаться на приведенное выше определение транспортирующей способности потока, данное Н.Е. Кондратьевым [3]. Транспортирующая способность потока — это крайняя точка в фазовом гидравлическом состоянии потока, соответствующая максимальному расходу наносов при фиксированном расходе воды. Этой точке соответствует максимально возможная при данном расходе воды средняя скорость потока (и сопряженная с этой скоростью минимальная средняя глубина потока). Все точки, формирующие фазовое гидравлическое пространство, соответствуют транспортирующему потенциалу потока (набору разных значений расхода наносов), они определяются различным сопряжением глубины и скорости (при фиксированном расходе воды).

2. Замечание по построению фазового гидравлического пространства

Графическое представление фазового гидравлического пространства. Этот вид зависимости порожден различными сочетаниями значений двух величин, в результате перемножения которых должно получиться фиксированное число (начальный курс мат. анализа). Достаточно подробно это объясняется в статье: при фиксированном расходе воды $Q = \text{const}$, для поперечного сечения русла прямоугольной формы ($B = \text{const}$), при единичной ширине $B = 1$ расход воды Q может определяться различными сочетаниями средних по поперечному сечению значений глубины h и скорости v .

Фазовое пространство — это пространство состояний системы, поэтому такое определение полученного поля возможных сочетаний значений глубины и скорости вполне правомерно. Строгую прямоугольную форму русла естественных водотоков найти практически невозможно, поэтому представленный график носит идеализированный иллюстративный характер. И вид зависимости в соответствии с формой поперечного сечения русла поменяет свой вид. К сожалению, рецензент в этой части статьи воспринял все излишне буквально.

Идея фазового гидравлического пространства. Влияние содержания твердого вещества в водном потоке на соотношение гидравлических переменных состояния этого потока (при фиксированном расходе воды) исследовалось многими учеными как в условиях лабораторных экспериментах (В. Ванони), так и в теоретических построениях (Г.И. Баренблатт). Есть также работа Н.А. Колмогорова [2], где он показал, что энергия для поддержания частиц во взвешенном состоянии

отбирается от турбулентных пульсаций, а не от осредненного движения, как следовало из гравитационной теории М.А. Великанова. Концепция данной работы представлена гипотезой (обоснованной прежде другими исследователями) и состоит именно в таком характере влияния взвешенного вещества на гидравлику потока. Причем анализ данных наблюдений и дальнейшие построения и расчеты, основанные на этой концепции, показали хорошие результаты и подтвердили абсолютную согласованность с принятой гипотезой [6].

Формула Шези. Вид связи гидравлических переменных состояния. Все построения в статье определены исключительно для двухфазного потока, то есть для взвесенесущего. Как уже было показано выше, все исследователи определяют влияние содержащегося в потоке твердого вещества на его гидравлику. Другой вопрос — направленность этих влияний. Формула Шези взвесенесущую нагрузку не учитывает. Эта формула представляет собой гидравлическое соотношение переменных состояния водного (однофазного) потока с эмпирическим коэффициентом, определяющим трение. В таком представлении связь гидравлических переменных состояния потока полностью согласуется с гравитационной теорией движения наносов М.А. Великанова. При этом соотношение Шези — Маннинга, не учитывающее взвешенные наносы, корректно только в том случае, если число Колмогорова $Ko \approx 0$ или $\ll 1$.

В формуле Шези представлена *однозначная связь* средних по поперечному сечению гидравлических переменных состояния в пределах одного и того же значения расхода воды для однофазного потока. Тогда как фазовое гидравлическое пространство представляет *набор сочетаний* этих переменных состояния при фиксированном расходе воды для двухфазного потока. Таким образом, в пределах одного расхода воды скорость и глубина могут быть различными. Такой подход как раз предполагается в теории турбулентности А.Н. Колмогорова [2].

Крайние точки фазового гидравлического пространства. «... использование ее (функции — М.Ш.) в качестве гидравлического закона ..., отвергающее элементарные гидравлические законы, приводит к парадоксальным выводам. В этой связи понятие «фазовое гидравлическое пространство», так же как и крайние точки полученной функции, не имеет физического (гидравлического) объективного смысла» [1]. Крайние точки назначены на основании выводов, сделанных не автором, а, например, В. Ванони и Г.И. Баренблаттом. Жаль, что работы этих великих ученых оказались недооценены рецензентом В.М. Католиковым.

3. Вывод формулы

Аналитическая формула расхода наносов. «Эта формула, которая, по мнению авторов, является следствием основного уравнения движения воды и твердого вещества и построена на основании сил, действующих в системе водный поток — донные отложения — наносы» [1]. Аналитическая формула расхода наносов является следствием основного уравнения этой модели. Это не мнение авторов, а результат строгого математического вывода при допущении о равномерном и установившемся движении потока.

«В данной статье авторы утверждают, что «расход наносов G и глубина в аналитической формуле расхода наносов взаимосвязаны между собой, то есть потоку при фиксированных расходе воды и уклоне соответствует именно та глубина, которая определяется текущей взвесенесущей нагрузкой потока. То есть при увеличении расхода наносов скорость потока увеличится, а глубина уменьшится» [6]. Хотелось бы обратить внимание на то, что из этой формулы совершенно не следует приведенный авторами вывод. В формуле глубина является аргументом, а не функцией, т. е. независимой от функции переменной, а расход наносов — функцией, т. е. величиной, зависящей от аргумента (глубины потока)» [1]. Недопонимание этого вопроса аналогично приведенному выше, связанному с анализом формулы Шези. Аналитическая формула расхода наносов выведена для средних в поперечном сечении гидравлических переменных состояния потока для фиксированного расхода воды. Концепция фазового гидравлического пространства состоит в том, что в пределах одного и того же расхода воды может быть разное сочетание гидравлических переменных состояния. Таким образом, на основе аналитической формулы расхода наносов и этой концепции полагается, что максимальному расходу наносов (транспортирующей способности потока) в пределах фиксированного расхода воды будет соответствовать минимальная глубина, а значит, и максимальная скорость. Это означает, что от средних значений переменных состояния потока в этой формуле на основании концепции фазового гидравлического пространства можно перейти к конкретным (крайним, граничным) значениям переменных состояния.

Прямая или обратная пропорция расхода наносов и глубины. При делении аналитической формулы расхода наносов [6] на расход воды получается мутность воды. В итоге получается, что мутность воды обратно пропорциональна средней глубине потока ($S \sim 1/h$). Данная зависимость является классической и используется при выводе соответствующих формул [7]. Структура формулы и ее аргументы абсолютно согласуются с аналогичными выражениями других исследователей.

Мировоззрение. «...из своих мировоззренческих убеждений, заключающихся в том, что “...нахождение в потоке твердого вещества значительно уменьшает пульсации скоростей, течение становится относительно упорядоченным...”» [1]. Это не мировоззрение, а почти дословная выдержка из статьи Г.И. Баренблатта: «Благодаря падению энергии турбулентности, часть которой затрачивается на работу взвешивания частиц, падает и турбулентное сопротивление, так что поток (сравнительно с потоком чистой жидкости) ускоряется. Тяжелые взвешенные частицы ускоряют поток — это кажется парадоксальным! Но это на самом деле так. Сопоставление с превосходными экспериментами американского исследователя В. Ванони подтвердило этот вывод» [2].

Спорность гипотезы. «...в данной статье речь идет о явлениях, имеющих отношение к гидравлическим режимам и механизму движения наносов в водном потоке при гидротранспорте и при движении потоков с гиперконцентрациями взвешенных наносов (сели, например), но никак не к речным потокам» [1]. Здесь следует рассмотреть две стороны вопроса.

Одна сторона — это то, что концепция основана на гипотезе, которая подтверждается экспериментальными и теоретическими выкладками авторитетных ученых. И эта концепция себя оправдала, по крайней мере, в рамках приведенного в статье [6] исследования.

Другая сторона состоит в том, что «... Профессор М.А. Великанов, много занимавшийся проблемой движения наносов еще до нашей работы, правильно вычислил работу взвешивания. Однако он вставил ее насильно в уравнение баланса энергии осредненного движения, т. е. в уравнение, получающееся умножением уравнений Рейнольдса для средней скорости на саму среднюю скорость. И вот этот-то шаг был неверным, причем неверным принципиально. В моей же работе, которая уже складывалась в основательное исследование, было выведено уравнение баланса турбулентной энергии, и работа по взвешиванию естественным образом вошла в это уравнение как дополнительный «расходный член» (на самом деле много больший, чем скорость вязкой диссипации турбулентной энергии в тепло)» [2]. Как видно из приведенной цитаты, речь идет о речном потоке, а не о гидро-смеси. Осталось только соотнести «много больший» (из цитаты) и вклад скорости вязкой диссипации.

Ключевое замечание. «...полученная аналитическая формула транспортирующей способности потока ... не только не соответствует гидравлическим законам движения жидкости и объективному механизму взаимодействия потока и подвижных наносов, но и не относится к речным потокам» [1]. Вывод, который невозможно прокомментировать, не поднимая вышеизложенный материал данного отзыва; то есть все, что в очередной раз неясно рецензенту В.М. Католикову, изложено в данной статье выше.

4. Общие замечания

Недоумение. «...вызывает некоторое недоумение выбор авторами расчетных формул для выполнения тестовых расчетов» [1]. Как показал обзор научных публикаций последних десятилетий, наиболее используемой для расчета формулой является формула Е.А. Замарина. А формулы Р. Бэгнольда и В.Н. Гончарова для расчета транспортирующей способности потока рекомендованы в соответствующем нормативном документе [4]. «Определение транспортирующей способности потока при расчете трансформации русла может производиться по одной из формул, целесообразность применения которых оправдывается имеющимся опытом расчетов» [4].

Формула Р. Бэгнольда. «При этом авторы статьи использует в работе расчетную формулу Р. Бэгнольда в трактовке ..., которая отличается от оригинальной зависимости...» [1]. Вновь ссылаюсь на нормативный документ, где рекомендована формула Р. Бэгнольда именно в таком виде [4].

Корректность использования формул. «...при тестировании расчетных формул ... не приводятся сведения о крупности донных отложений в избранных для тестирования реках, что ставит под сомнение корректность применения всех использованных при тестировании формул» [1]. При внимательном

прочтении статьи [6] можно увидеть, что авторы тщательно следят за соответствием гидравлических характеристик водотоков и границами применимости используемых формул. Например, «Выполнение условий применимости формулы Гончарова имело место лишь для семи из пятнадцати водотоков, а для формулы Замарина — для тринадцати водотоков» [6].

5. Особый интерес

«Особый интерес вызывает использование авторами новой методики проверки достоверности расчетов...» [1]. Такой подход нельзя назвать новым, он рекомендован и в нормативных документах. Подобный качественный анализ допускается, например, в СО 34.21.204-2005: «в этом случае верхняя огибающая характеризует транспортирующую способность потока» [4].

И в заключение выражаю искреннюю благодарность редакции журнала «Ученые записки РГГМУ» за организацию дискуссии, столь необходимой для более детального рассмотрения вопросов, изложенных в статье [6].

Список литературы

1. Католиков В.М. О статье «Транспортирующая способность потока» // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 56. С. 188—193.
2. Колмогоров в воспоминаниях учеников. М.: изд-во МЦМНО, 2006. 472 с.
3. Кондратьев Н.Е. Русловые процессы рек и деформации берегов водохранилищ. СПб: Знак, 2000. 258 с.
4. СО 34.21.204-2005 «Рекомендации по прогнозу трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов». СПб: изд-во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2006. 104 с.
5. Чеботарев А.И. Гидрологический словарь. Л.: Гидрометеоздат, 1978.
6. Шмакова М.В., Кондратьев С.А. Транспортирующая способность речного потока. Фазовое гидравлическое пространство // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 56. С. 176—187.
7. Bogárdi J. Sediment transport in alluvial streams. Budapest: Akadémiai Kiadó. 1974. 826 p.
8. Wu Weiming. Computational River Dynamics. CRC Press, 2007. 509 p.

References

1. Katolikov V.M. About the article “Transport capacity of flow”. *Uchenye zapiski RGGMU*. Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. 2019, 56: 188—193. [In Russian].
2. *Kolmogorov v vospominaniyah uchenikov*. Kolmogorov in the memories of students. M., izd-vo MC-MNO, 2006: 472 p. [In Russian].
3. *Kondrat'ev N.E. Ruslovyje processy rek i deformacii beregov vodohranilishch*. River bed processes and deformation of reservoir banks. SPb: Znak, 2000: 258 p. [In Russian].
4. SO 34.21.204-2005 «*Rekomendacii po prognozu transformacii rusla v nizhnih b'efah gidrouzlov*». Organizations standard 34.21.204-2005 “Recommendations on the forecast of the channel transformation in the lower reaches of hydroelectric facilities”. SPb: izd-vo VNIIG im. B.E. Vedeneeva, 2006: 104 p. [In Russian].
5. *CHebotarev A.I. Gidrologicheskij slovar'*. Hydrological dictionary. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1978. [In Russian].
6. *SHmakova M.V., Kondrat'ev S.A. Transport capacity of flow. Uchenye zapiski RGGMU*. Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. 2019. 56: 176—187. [In Russian].

7. *Bogárdi J.* Sediment transport in alluvial streams. Budapest: Akadémiai Kiadó. 1974: 826 p.
8. *Wu Weiming.* Computational River Dynamics. CRC Press, 2007: 509 p.

Статья поступила 18.11.2019

Принята 26.11.2019

Сведения об авторе

Шмакова Мария Валентиновна — канд. техн. наук, научный сотрудник Института озераведения Российской академии наук, m-shmakova@yandex.ru

Information about author

Shmakova Marina Valentinovna — Candidate of Technical Sciences, Institute of Limnology, Senior Researcher