

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОТКРЫТОГО КАНАЛА В СРЕДЕ HEC-RAS

А. И. Ракицкий, инженер-исследователь

Полесский государственный университет, г. Пинск, Беларусь

Аннотация

Рассмотрена возможность использования программного обеспечения HEC-RAS для гидравлических расчетов открытой сети с оценкой адекватности результатов расчета по отношению к методикам и расчетным формулам, применяемым в Беларуси. Сравнение результатов расчета (проведенного в HEC-RAS в соответствии с формулами, приведенными в нормативной, справочной и учебной литературе) свидетельствует, что полученные значения имеют отклонения от 1 до 20 %. Анализ данных позволяет сделать выводы, что HEC-RAS можно использовать как альтернативный способ гидравлического расчета открытых русел.

Ключевые слова: канал, гидравлический расчет, коэффициент Шези, русло, HEC-RAS.

Abstract

A. I. Rakitsky

HYDRAULIC CALCULATION OF AN OPEN CHANNEL IN THE HEC-RAS ENVIRONMENT

The possibility of using the HEC-RAS software for hydraulic calculations of an open network with an assessment of the adequacy of the calculation results in relation to the methods and calculation formulas used in Belarus is considered. Comparison of the calculation results (obtained in HEC-RAS with the recommended formulas given in the normative, reference and educational literature) showed that the obtained values have deviations from 1 to 20 %. Data analysis allows us to conclude that HEC-RAS can be used as an alternative method for hydraulic calculation of open channels.

Keywords: channel, hydraulic calculation, Chezy coefficient, watercourse, HEC-RAS.

Введение

Протяженность открытых каналов в Республике Беларусь составляет 200 тыс. км, в том числе мелиоративных каналов – 156,2 тыс. км [1, 2]. Большинство открытых каналов запроектированы и построены с 1965 по 1990 гг. в составе мелиоративных осушительных, осушительно-увлажнительных или оросительных систем. Открытые каналы – важный элемент мелиоративной системы, они могут присутствовать в виде регулирующей, проводящей, оградительной сети, редко – водоприемника.

Структура распределения открытой сети в Беларуси представлена следующим образом: проводящая сеть – 59 %; регулирующая сеть – 31 %; водоприемники – 8 %; оградительная сеть – 2 % [2]. За период эксплуатации поперечное сечение канала подвергается изменению путем деформации откосов и дна канала с трапецеидального до параболического, а в итоге – на случайное, криволинейное. На рис. 1 приведен

пример изменения формы поперечного сечения канала «Я-6» мелиоративной системы «Путь к коммунизму» Пинского р-на Брестской обл.

С 2000 г. в Беларуси проводится широкомасштабная работа по ремонту и реконструкции осушительных систем, в том числе и открытой сети [3]. Доля реконструируемых каналов по отношению к новым может составлять 100 %.

На этапе проектных работ магистральные и проводящие каналы проходят проверку (гидравлический расчет) на удовлетворение двум основным критериям: а) пропуск расхода воды в существующих и проектных параметрах русла; б) размывающие и заиляющие скорости потока [4]. В реальности мелиоративные каналы через несколько лет работы уже нельзя считать призматическими; соответственно, их гидравлические параметры изменяются и не соответствуют расчетным. При проектировании это явление пока никак не учитывается.

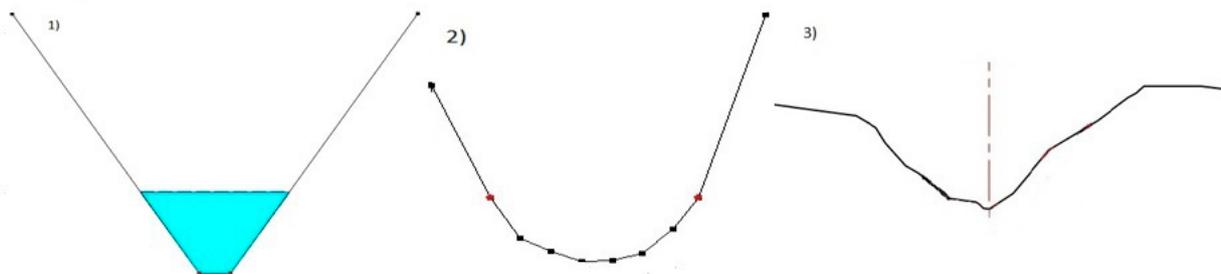


Рис. 1. Форма поперечного сечения канала Я-6:
1 – проектная; 2 – 7-й год эксплуатации; 3 – более 30 лет эксплуатации

Ошибочно принятые параметры канала могут приводить к процессам вторичного заболачивания, выходу дренажа из строя, а также поздним срокам сева, уборки и проведению других технологических операций. Это существенно снижает продуктивность мелиорированных площадей, увеличивает себестоимость продукции и ухудшает экономические

показатели сельскохозяйственного производства на осушенных землях. Поэтому верно смоделированный гидравлический режим открытых каналов и динамика его значений во времени позволяют обеспечить более точный расчет параметров каналов, применяемых при реконструкциях и ремонтах.

Методы исследований

Гидравлический расчет открытых каналов – сложная задача, которая решается путем подбора и проработки вариантов уровненного режима при разных параметрах канала. Решение данной задачи в практике проектирования можно свести к следующим вариантам расчета:

- 1) ручной (с использованием калькулятора, номограмм, графиков и т. д.);
- 2) реализованный в электронных таблицах (например, в среде *Microsoft Excel*);
- 3) выполненный с помощью программного обеспечения (далее – ПО).

Ручной способ гидравлического расчета выполняется графо-аналитическим способом или, например, подбором с помощью таблиц А. А. Агроскина [5], графиков Э. И. Михневича [6], линейки В. Ф. Пояркова [7]. Этот способ расчета очень трудоемок, а также в ходе его применения велика вероятность допущения ошибок как в исходных данных, так и в самом расчете, поэтому в сложных случаях обычно используется процедура проверки расчетов другим человеком. Проверяющему необходимо самостоятельно повторить все операции первого исполнителя, поэтому применение прогрессивного многовариантного проектирования при таком способе расчета маловероятно.

Гидравлический расчет с использованием электронных таблиц *Microsoft Excel* позволяет повысить скорость и качество расчета. В иссле-

довательских проектах, когда рассматривается множество вариантов конструкций, необходимо оценить процессы размыва и заиления; в сложных гидрологических условиях расчет неприемлемо затягивается и усложняется.

Ни в Беларуси, ни в Российской Федерации нет широкого опыта по использованию программного обеспечения для расчета каналов, как нет сертифицированного ПО по гидравлическому расчету открытых русел. В проектно-изыскательской организации ОАО «Полесьегипроводхоз» (г. Пинск, Брестская обл.) разработана программа по гидравлическому расчету реконструируемого канала. Однако она имеет сложную специфику ввода данных и предназначена для внутреннего использования; основана на топографических изысканиях, интегрирована в ПО *AutoCAD*, имеет технические ограничения в применении; алгоритм гидравлического расчета выполнен по методическим указаниям 1987 г. и до настоящего времени не сертифицирован. Поэтому в части оценки эффективности данной программы для расчетов открытой сети при проектировании и в исследовательских работах приходится ориентироваться на зарубежный опыт. Поиск подходящих вариантов по расчету потока в открытых руслах в странах ближнего и дальнего зарубежья привел к компьютерной программе *Hydrologic Engineering Center's – River*

Analysis System (HEC-RAS), которая разработана Гидрологическим инженерным центром (Институт водных ресурсов, США) [8]. Эта программа де-факто стала стандартом и широко используется специалистами в США, Канаде, Мексике, странах Латинской Америки и Европы.

HEC-RAS позволяет моделировать установившееся движение потока, производить одномерные и двухмерные расчеты неустановившегося потока, транспортирующей способности потока (оценка на заиливание русла). Выбор именно этого ПО был обусловлен нашими финансовыми возможностями и доступностью *HEC-RAS* на бесплатной основе, причем он устанавливается без ограничения по функциональным возможностям.

Однако для широкого применения *HEC-RAS* в практике проектирования в Беларуси необходимо доказать, что методически он идентичен методам расчетов, используемым в нашей стране. Соответственно, результаты расчетов, проведенных с помощью данного продукта, могут быть получены и после расчетов, сделанных вручную с допустимой точностью отклонения. Эта задача и ставилась при выполнении настоящей работы.

Согласно руководству по гидравлическому расчету в разделе *Help* [9] гидравлический расчет открытой сети в условиях установившегося движения выполняется по формуле:

$$Q = \frac{1,486}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}, \quad (1)$$

где Q – расход;

A – площадь поперечного сечения потока;

R – гидравлический радиус;

S – гидравлический уклон;

n – коэффициент шероховатости, выражен по формуле Маннинга [9]:

$$n = \frac{1}{C} \cdot R^{1/6}, \quad (2)$$

где C – коэффициент Шези, $m^{0,5}/c$.

В упомянутом руководстве формула (1) приведена в английской системе измерения.

Основная часть

Цели данной работы:

а) сделать гидравлический расчет открытого канала в ПО *HEC-RAS* с определением глубин и скоростей потоков в диапазоне рас-

ходов для деформированного и трапециевидного русел;

б) определить количественное отклонение полученных результатов расчета в названном

В метрической системе измерения формула (1) имеет следующий вид:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3)$$

В формулах (3), (4) и (5) обозначения будут те же, что и в (1), поэтому, подставив в (3) вместо n ее выражение (2), получим зависимость:

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{C} \cdot R^{1/6}} \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}. \quad (4)$$

После математического преобразования получим формулу:

$$Q = C \cdot A \cdot \sqrt{R \cdot S}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (5)$$

Заменяем буквенное обозначение параметров в формуле (5) на соответствующее обозначение, используемое в нормативной, справочной и учебной литературе Республики Беларусь: буквы C и R не меняются, так как они совпадают по обозначению, смыслу и размерности. Площадь поперечного сечения потока $A = w$, размерность m^2 . Гидравлический уклон $S = i$ – безразмерная величина. Получаем формулу (6):

$$Q = C \cdot w \cdot \sqrt{R \cdot i}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6)$$

где C – коэффициент Шези, $m^{0,5}/c$;

w – площадь поперечного сечения, m^2 ;

R – гидравлический радиус, m ;

i – гидравлический уклон.

Формула (6) является классической формулой Шези, используемой в белорусской науке в расчетах по гидравлике открытых русел в условиях установившегося потока.

Таким образом, методическая основа расчетов в ПО *HEC-RAS* в основном совпадает с методиками и методами расчета открытой сети на мелиоративных системах. Единственное отличие заключается в том, что в Беларуси чаще применяется коэффициент шероховатости, рассчитываемый по одной из версий формулы Н. Н. Павловского, а в *HEC-RAS* – выражение, в основе которого лежит формула Р. Маннинга. Далее оценим отличия в результатах расчетов.

программном обеспечении от расчетных значений, полученных по формуле (6), и экспериментальных измерений;

в) сравнить результаты расчетов и сделать вывод об их идентичности и допустимости использования ПО *HEC-RAS* при расчетах открытой сети в Республике Беларусь.

Объект исследования – открытый канал мелиоративной системы.

Типы форм поперечного сечения канала:

1 тип – трапецидальное с параметрами: заложение откоса $m = 2$, ширина по дну $b = 1$ м, продольный уклон дна $i = 0,0003$;

2 тип – деформированное (приближенное к параболе); форма принята аналогичной поперечному сечению канала «Я-6» мелиоративной системы «Путь к коммунизму» Пинского р-на Брестской обл.

Данные по сечению канала «Я-6» получены в июне 2022 г. путем нивелирования. В расчетах приняты следующие расходы воды: 0,1; 0,5; 1; 5 и 10 м³/с. В данном диапазоне расходов воды работает множество открытых каналов мелиоративной сети как в меженный период, так и в весенний и летне-осенний. В формуле (6) w , R , i – параметры русла, которые определяются экспериментально или задаются. Коэффициент шероховатости принят как для канала с креплением откосов, выполненным путем посева трав, равный $n = 0,033$, – это константа для всего периметра русел типов 1 и 2. Площадь поперечного сечения для типа 2 определена путем разбивки на элементарные геометрические фигуры (треугольник, трапеция) для соответствующей глубины; в дальнейшем площади фигур суммировались.

Коэффициент Шези (C) – фактор, учитывающий сопротивления всех видов трения по длине потока и влияющий на пропускную способность водотока. Сейчас существует более 200 формул по расчету коэффициента Шези, полученных эмпирическим или эмпирико-аналитическим способом. Все формулы по определению коэффициента Шези можно разделить на 4 группы, где в каждой последовательно учитываются:

1) такие характеристик поперечного сечения, как гидравлический радиус R , глубина h и коэффициент шероховатости n , $C = f(n, R, h)$;

2) только гидравлический уклон водотока, $C = f(i)$;

3) выступ гряд, выступ шероховатости и характеристики шероховатости, $C = f(d, h_r/L_r, \Delta)$;

4) относительная ширина потока, $C = f(B/h)$.

Формулы расчета коэффициента Шези из первой группы учитывают поперечное сечение потока через гидравлический радиус, а коэффициент шероховатости используется как показатель, более полно характеризующий поперечное сечение. Стоит заметить, что гидравлический радиус R полностью не отображает морфометрию живого сечения потока, так как при одном и том же значении R могут принимать разные формы русла (трапецидальная, полигональная, параболическая и др.). В расчете используем формулы для C из первой группы, так как они широко применяются в практических расчетах и учитывают поперечную форму канала через R .

Формула Н. Н. Павловского для определения коэффициента Шези приведена как основная для гидравлического расчета [4, 10, 11]:

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^y, \text{ м}^{0,5}/\text{с}, \quad (7)$$

где n – коэффициент шероховатости;

y – показатель степени, определяется по формуле:

$$y = 2,5 \cdot \sqrt{n} - 0,13 - 0,75 \cdot \sqrt{R} \cdot (\sqrt{n} - 0,1). \quad (8)$$

Н. Н. Павловский не рекомендует использовать формулу (7) для значений при $R > 3$. Далее по тексту будут применяться те же обозначения, что и в формуле (6).

Формула И. И. Агроскина и Д. В. Штеренлихта [12]:

$$C = \frac{1}{n} + (25,5 - 300 \cdot n) \cdot \lg R, \text{ м}^{0,5}/\text{с}. \quad (9)$$

Г. В. Железняков на основании данных Н. Н. Павловского получил логарифмическую формулу для определения C без ограничений по n и R [13]:

$$C = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{1}{n} - \frac{\sqrt{g}}{0,13} \cdot (1 - \lg R) \right] + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left[\frac{1}{n} - \frac{\sqrt{g}}{0,13} \cdot (1 - \lg R) \right]^2 + \frac{\sqrt{g}}{0,13} \cdot \left(\frac{1}{n} + \sqrt{g} \cdot \lg R \right)}, \text{ м}^{0,5}/\text{с}, \quad (10)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

В расчеты также включены формулы Р. Маннинга (11) и Гангилие – Куттера (12):

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6}, \text{ м}^{0,5}/\text{с}, \quad (11)$$

$$C = \frac{23 + \frac{1}{n}}{1 + 23 \cdot \frac{n}{\sqrt{R}}}, \text{ м}^{0,5}/\text{с}. \quad (12)$$

Расчет значений средней скорости v и глубины потока h выполнялся в электронной та-

блице *Microsoft Excel* по формуле расходной характеристики K :

$$K = w \cdot C \cdot \sqrt{R}. \quad (13)$$

Средняя скорость определена по формуле:

$$v = C \cdot \sqrt{R \cdot i}, \text{ м/с}. \quad (14)$$

В соответствии с руководством [9] выполнен отдельный расчет для каждого типа русла. Результаты расчета сведены в табл. 1. Значения v и h для графы 13 взяты из итоговой таблицы *HEC-RAS*.

Таблица 1. Значения C , v и h в зависимости от расчетной формулы

Расход, м ³ /с	Коэффициент Шези C , м ^{0,5} /с по формуле:					Расчетные показатели: v – скорость потока, м/с; h – глубина потока, м	Значение v и h в расчетах по формуле:					
	Н. Н. Павловского	И. И. Агроскина и Д. В. Штеренлихта	Г. В. Железнякова	Р. Маннинга	Гангилие – Куттера		Н. Н. Павловского	И. И. Агроскина и Д. В. Штеренлихта	Г. В. Железнякова	Р. Маннинга	Гангилие – Куттера	HEC-RAS
Тип 1												
0,1	19,84	19,30	21,86	23,47	20,54	v	0,17	0,16	0,18	0,19	0,17	0,20
						h	0,36	0,36	0,34	0,32	0,34	0,31
0,5	23,77	23,77	25,05	26,13	24,56	v	0,27	0,27	0,28	0,29	0,28	0,31
						h	0,74	0,74	0,72	0,71	0,73	0,68
1	25,62	25,70	26,51	27,33	26,32	v	0,33	0,33	0,34	0,35	0,34	0,37
						h	1,00	1,00	0,98	0,98	1,00	0,95
5	30,20	30,20	30,22	30,23	30,22	v	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,54
						h	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,93
10	32,19	32,22	31,90	31,56	31,88	v	0,63	0,63	0,62	0,62	0,62	0,64
						h	2,58	2,58	2,59	2,60	2,60	2,55
Тип 2												
0,1	19,43	18,80	21,42	23,17	20,21	v	0,16	0,16	0,17	0,18	0,16	0,18
						h	0,31	0,31	0,29	0,28	0,30	0,30
0,5	24,06	24,08	25,21	26,24	24,80	v	0,28	0,28	0,29	0,30	0,28	0,30
						h	0,65	0,65	0,63	0,62	0,64	0,63
1	26,34	26,37	27,06	27,72	26,89	v	0,36	0,36	0,36	0,37	0,36	0,39
						h	0,91	0,9	0,89	0,88	0,90	0,87
5	31,50	31,45	31,28	31,09	31,22	v	0,59	0,59	0,59	0,58	0,59	0,64
						h	1,89	1,89	1,89	1,90	1,87	1,92
10	33,40	33,29	32,92	32,40	32,85	v	0,70	0,70	0,70	0,69	0,69	0,77
						h	2,74	2,74	2,77	2,80	2,77	2,70

По результатам расчета (графы 8–13) построены зависимости $v = f(Q)$ и $h = f(Q)$ для русел 1-го и 2-го типов.

На рис. 2 показана зависимость $v = f(Q)$: значения v распределены по одной зависимости с небольшим отклонением между собой.

Минимальные значения v имеет формула (9) для расхода от 0,1 по 1 м³/с и формулы (10), (11) и (12) – расход 10 м³/с. Для расхода 5 м³/с все формулы показали одинаковое значение v (0,52 м/с). Максимальное значение v получено в *HEC-RAS* для всего диапазона расходов.

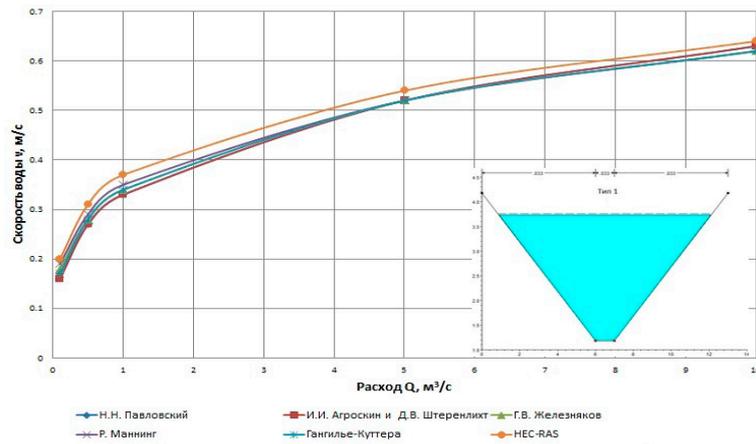


Рис. 2. Зависимость скорости потока от расчетной формулы C (русло 1-го типа)

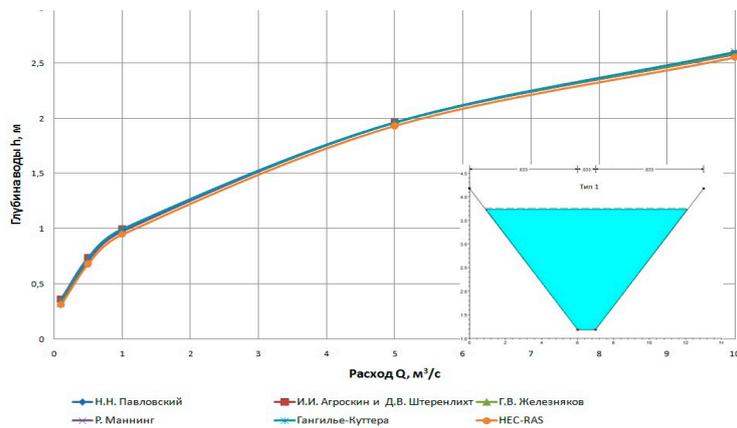


Рис. 3. Зависимость глубины потока от расчетной формулы C (русло 1-го типа)

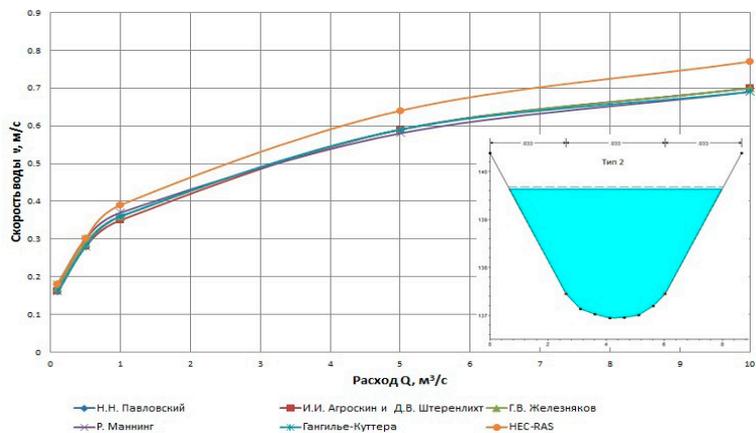


Рис. 4. Зависимость скорости потока от расчетной формулы C (русло 2-го типа)

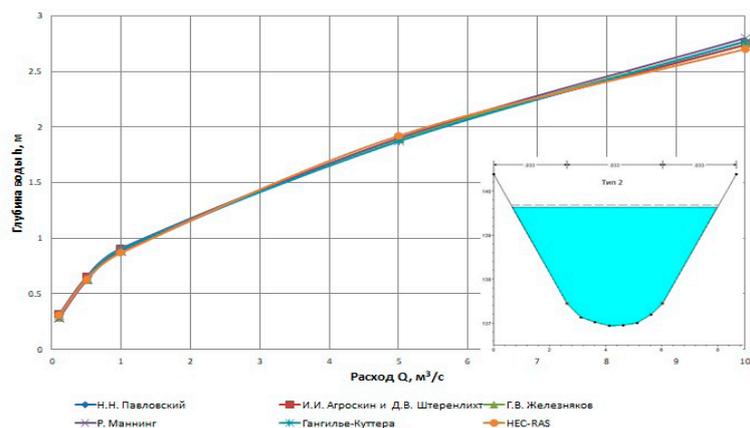


Рис. 5. Зависимость глубины потока от расчетной формулы C (русло 2-го типа)

Сопоставление данных (рис. 3) показывает, что между значениями h есть небольшое отклонение. Минимальные значения h получены для всего диапазона расходов в *HEC-RAS*.

Максимальные значения h для расхода от 0,1; 0,5; 1 м³/с по формулам (7) и (9) для расхода показали 10 м³/с по формулам (11) и (12). Для расхода в 5 м³/с у формул (7), (9), (10), (11) и (12) одинаковое значение h (1,96 м).

На рис. 4 функция $v = f(Q)$ показывает, что значения v распределены по одной зависимости с небольшим отклонением между собой. Минимальные значения v имеют формулы (7), (9) и (12) для расхода от 0,1 по 0,5 м³/с; формулы (11) и (12) – для расхода 10 м³/с; формула (11) – для рас-

хода 5 м³/с. Максимальное значение v получено в *HEC-RAS* для всего диапазона расходов.

Значения функции $h = f(Q)$ (рис. 5) распределены по одной зависимости с небольшим отклонением между собой. Минимальные значения h разбросаны как по диапазону Q , так и по C . Максимальные значения h в диапазоне расхода от 0,1 по 1 м³/с получены по формулам (7) и (9), для 5 м³/с – в *HEC-RAS* и для 10 м³/с – по формуле (11).

Определение количественного отклонения значений v и h выполнено путем вычисления разницы между эталонным значением и расчетным. За эталонное значение приняты значения *HEC-RAS*. Результаты сведены в табл. 2.

Таблица 2. Количественное отклонение v и h от значений *HEC-RAS*

Расход, м ³ /с	Расчетная формула						Отклонение от эталонного значения		Отклонение от эталонного значения, %	
	Н. Н. Павловского	И. И. Агроскина и Д. В. Штеренлихта	Г. В. Железнякова	Р. Маннинга	Гангиле – Куттера	<i>HEC-RAS</i>	min	max	min	max
Тип 1. V , м/с										
0,1	0,17	0,16	0,18	0,19	0,17	0,20	0,01	0,04	5	20
0,5	0,27	0,27	0,28	0,29	0,28	0,31	0,02	0,04	6	13
1	0,33	0,33	0,34	0,35	0,34	0,37	0,02	0,04	5	11
5	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,54	0,02	0,02	4	4
10	0,63	0,63	0,62	0,62	0,62	0,64	0,01	0,02	2	3
Тип 1. H , м										
0,1	0,36	0,36	0,34	0,32	0,34	0,31	0,01	0,05	3	16
0,5	0,74	0,74	0,72	0,71	0,73	0,68	0,03	0,06	4	9
1	1	1	0,98	0,98	1	0,95	0,03	0,05	3	5
5	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,93	0,03	0,03	2	2
10	2,58	2,58	2,59	2,6	2,6	2,55	0,03	0,05	1	2
Тип 2. V , м/с										
0,1	0,16	0,16	0,17	0,18	0,16	0,18	0,01	0,02	6	11
0,5	0,28	0,28	0,29	0,3	0,28	0,3	0,01	0,02	3	7
1	0,36	0,35	0,36	0,37	0,36	0,39	0,02	0,04	5	10
5	0,59	0,59	0,59	0,58	0,59	0,64	0,05	0,06	8	9
10	0,7	0,7	0,7	0,69	0,69	0,77	0,07	0,08	9	10
Тип 2. H , м										
0,1	0,31	0,31	0,29	0,29	0,3	0,3	0,01	0,02	3	7
0,5	0,65	0,65	0,63	0,62	0,64	0,63	0,01	0,02	2	3
1	0,91	0,9	0,89	0,88	0,9	0,87	0,01	0,04	1	5
5	1,89	1,89	1,89	1,89	1,9	1,92	0,02	0,05	1	3
10	2,74	2,74	2,77	2,8	2,77	2,7	0,04	0,1	1	4

Анализ табл. 2 для русла 1-го типа показывает: значения скорости воды отклоняются в диапазоне от 0,01 до 0,04 м/с (от 2 до 20 %); глубина воды от 0,01 до 0,06 м (от 1 до 16 %). Русло 2-го типа: значения скорости изменяются от 0,01 до 0,08 м/с (от 3 до 11 %); глубина воды от 0,01 до 0,10 м (от 1 до 7 %). Отклонение результата расчета от эталонных для русла типа 1 имеет тренд к уменьшению с увеличением

Заключение

1. Сравнение результатов гидравлического расчета открытых русел трапецеидальной формы (тип 1) в технологии *HEC-RAS* и по формулам Шези – Павловского показало, что результаты близки. Отклонения значений, полученных в *HEC-RAS* от формул (7), (9), (10), (11) и (12), уменьшаются с увеличением расхода: для скорости воды с 20 до 3 % и для глубины потока с 16 до 2 %. Наибольшее отклонение находится в диапазоне расхода от 0,1 до 1 м³/с, для скорости воды – с 20 до 11 % и для глубины воды с 16 до 5 %; наименьшее отклонение – в диапазоне расхода от 1 до 10 м³/с, для скорости воды с 5 до 2 % и для глубины воды с 3 до 1%.

2. Результаты гидравлического расчета открытых русел криволинейной формы (тип 2) в *HEC-RAS* также имеют приемлемые отклонения. Разброс отклонений находится в диапазоне от 3 до 11 % для скорости потока и от 1 до 7 % для глубины потока. Отклонения не имеют такой явной зависимости от расхода, как для трапецеидальной формы русла, и распределены приблизительно одинаково: как для расхода 0,1 м³/с, так и для 10 м³/с соответственно, 11 и 10 % – для скорости воды, от 7 до 4 % – для ее глубины. Минимальные значения для скорости потока – от 3 до 9 %, для глубины потока – от 1 до 3 %.

3. Гидравлический расчет открытой сети в ПО *HEC-RAS* для любых форм русел – это аль-

тернативный эффективный вариант, который позволяет быстро и точно получить расчетные данные как в табличной форме, так и в графическом виде для каждого заданного сечения. Данный программный продукт можно рекомендовать к использованию в учебных заведениях, проектных и научно-исследовательских организациях.

4. Формула Р. Маннинга (11) проста по выражению. В расчетах она показала, что ее расчетные значения находятся в приемлемых значениях, не выделяются на фоне остальных результатов.

5. Громоздкие по выражению формулы (7) и (10) для определения коэффициента Шези имеют небольшие расхождения значений между собой. Они существенно не влияют на результат расчета как для трапецеидального русла, так и для деформированного – по сравнению с простыми по выражению формулами (11) и (12). Необходимо учитывать, что в реальных условиях всегда имеются отклонения параметров канала между проектными и фактическими, так как в геодезических работах по выносу параметров канала в натуру и его устройство экскаватором имеются погрешности.

Таким образом, применение формул (7) и (10) в гидравлических расчетах не всегда оправдывается, поскольку они усложняют расчет.

Библиографический список

1. Макарэвіч, А. А. Рэкі і каналы / А. А. Макарэвіч // Беларус. энцыкл. : у 18 т. – Мінск, 2004. – Т. 18, кн. 2. – С. 45.
2. Карнаухов, В. Н. Эрозионно-аккумулятивные процессы на открытой сети мелиоративных систем : монография / В. Н. Карнаухов. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 347 с.
3. О республиканской программе «Сохранение и использование мелиоративных земель на 2000–2005 годы» [Электронный ресурс] : постановление Совета Министров Респ. Беларусь,

20 янв. 2000 г., № 76 // ЭТАЛОН. Законодательство Респ. Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2022.

4. Мелиоративные системы и сооружения. Нормы проектирования. = Меліарацыйныя сістэмы і збудаванне. Нормы праектавання : ТКП 45-3.04-8-2005 (02250). – Введ. 01.11.05. – Минск : Стройтехнорм, 2006. – 105 с.

5. Агроскин, И. И. Гидравлический расчет каналов : учеб. пособие / И. И. Агроскин. – Москва : Госэнергоиздат, 1958. – 80 с.

6. Михневич, Э. И. Новые способы гидравлического расчета каналов / Э. И. Михневич // Мелиорация. – 2016. – № 3 (77). – С. 7–12.

7. Литт, Б. Я. Линейка Пояркова для гидравлического расчета каналов / Б. Я. Литт. – Ташкент : Госиздат УзССР, 1955. – 32 с.

8. US Army [Electronic resource] : USACE predictive software improving flood fights at home and abroad. – Mode of access: https://www.army.mil/article/261124/usace_predictive_software_improving_flood_fights_at_home_and_abroad. – Data of access: 11.11.2022.

9. Brunner, Gary W. HEC-RAS River Analysis System : Hydraulic Reference Manual / US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. – Davis, 2016. – 143 p.

10. Маслов, Б. С. Мелиорация и водное хозяйство / Б. С. Маслов // Справочник : [в 3 т.] / Под ред. Б. С. Маслова. – Москва : Агропромиздат, 1985. – Т. 3. Осушение. – 447 с.

11. Штеренлихт, Д. В. Гидравлика : учебник / Д. В. Штеренлихт; ред. Н. М. Щербакова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Колос, 2008. – 655 с.

12. Агроскин, И. И. Уточненная формула для коэффициента Шези / И. И. Агроскин, Д. В. Штеренлихт // Гидротехника и мелиорация. – 1965. – № 9. – С. 32–35.

13. Железняков, Г. В. Теория гидрометрии : монография / Г. В. Железняков. – Изд. 2, перераб. и доп. – Л. : Гидрометеиздат, 1976. – 344 с.

14. Шкутов, Э. Н. Оценка возможности проведения подпочвенного увлажнения на площадях осушительных систем южной и центральной части Беларуси / Э. Н. Шкутов, В. П. Иванов, А. И. Ракицкий // Мелиорация. – 2017. – № 2 (80). – С. 10–22.

Поступила 14 ноября 2022 г.