

**ТЕОРЕТИКО-ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ РЕЧНОГО БАСЕЙНА  
РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН**

О.Х.АМИРОВ  
E.mail. ksucta@elcat.kg

*Гидромеханиканын теңдемелеринин системаларын унификациялоо жана фильтрация теориясын, ошондой эле чектеш катмардагы жана түтүктөрдөгү турбуленттик агымдын логарифмикалык законун аналитикалык жол менен чыгарууну теоретикалык изилдөөлөрдүн жыйынтыктары келтирилген. Таджикистан Республикасынын дарыя бассейндеринин гидрологиялык маалыматтарын пайдалануунун колдонмо аспекттери аныкталган.*

*Приведены результаты теоретических исследований по унификации систем уравнений гидромеханики и теории фильтрации, а также аналитический вывод логарифмического закона турбулентного течения в пограничном слое и в трубах. Определены прикладные аспекты использования гидрологических данных речного бассейна Республики Таджикистан.*

*The results of the theoretical study on unification systems of equations of fluid mechanics and the theory of filtration and analytical output of the logarithmic law of the turbulent flow in the boundary-layer and in the pipes are given. The applied aspects of using the river basin hydrological data of the Republic of Tajikistan are determined.*

В статье дан обзор обобщенной модификации систем дифференциальных уравнений среднего движения Навье-Стокса (1822; 1842), Рейнольдса (1895) /1/ в руслах и Н.Е.Жуковского (1889) /2/ в пористых средах. Она была впервые получена автором в последние годы в рамках теории мелкомасштабной турбулентности А.Н.Колмогорова /3/. Путем анализа данных множества опытов известных ученых и самого автора показана эффективность предлагаемой теории при оценке пульсационных характеристик потока в напорных трубах и открытых каналах, а также при изучении кинематических свойств реальных жидкостей в пористых средах /6-8/. Приведены прикладные аспекты использования гидрологических данных речного бассейна Республики Таджикистан с учетом теоретических положений.

### **1. К унификации систем уравнений гидромеханики и теории фильтрации.**

Как известно /1/, система уравнений Рейнольдса для средних скоростей и давления имеет тот же вид, что и система уравнений Навье-Стокса для мгновенных скоростей, с той лишь разницей, что к компонентам ньютонова напряжения прибавляются компоненты рейнольдсова напряжения  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ :

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \frac{X_i}{\rho} - \frac{\partial \bar{p}}{\rho \partial x_i} + \nu \Delta \bar{u}_i + \frac{1}{\rho} \sum_{j=1}^3 \frac{\partial (-\rho \overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j}, \quad (i, j = 1, 2, 3)$$

(1)

где  $u_i = \bar{u}_i + u'_i$ ;  $u_i, u'_i, \bar{u}_i$  – мгновенная, пульсационная и средняя составляющие вектора скорости движения частиц в макрообъеме или микропорах,  $\bar{p}$ ,  $\rho$  и  $\nu$  – давление, плотность и вязкость жидкости;  $X_i$  – проекции объемных сил,  $\Delta$  – оператор Лапласа.

Пусть в турбулентном потоке компоненты рейнольдсова напряжения в силу неразрывности вязкой жидкости являются функциями соответствующих компонент градиента осредненной скорости и разлагаются в сходящийся ряд в окрестностях точек экстремума скорости по степеням  $\partial \bar{u}_i / \partial x_j$ . Тогда в точке экстремума коэффициенты ряда состоят из компонентов напряжений  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  и их производных от соответствующего компонента градиента скорости. За точки экстремума примем точки контакта турбулентного потока с ламинарным подслоем или другим потоком, следующим рядом; второй точкой экстремума скорости будет точка на оси потока – она является точкой симметрии, а для класса обобщенных ньютоновских жидкостей /2; 6/ она будет точкой максимума.

В точке контакта рейнольдсовы напряжения имеют как нормальные напряжения (давления) вида  $\tau_{ii}^* = \rho \overline{u_i'^2} \Big|_*$  ( $i = j$ ), так и касательные  $-\tau_{ij}^* / \rho = -\overline{u'_i u'_j} \Big|_*$  ( $i \neq j$ ). При этом, подставляя полученный ряд в (1), получим уравнения Рейнольдса среднего движения с коэффициентами, имеющими физический смысл:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \frac{X_i}{\rho} - \frac{\partial \bar{p}}{\rho \partial x_i} + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\tau_{ij}^*}{\rho} + \nu(1 + \bar{\varepsilon}_{ij}^*) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{1}{2} \varepsilon_{ij}'^* \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right)^2 + \dots \right], \quad (\bar{\varepsilon}_{ij}^* = \frac{\varepsilon_{ij}^*}{\nu}) \quad (2)$$

где

$$\tau_{ij}^* = -\rho \overline{u'_i u'_j} \Big|_*, \quad \varepsilon_{ij}^* = \partial(-\overline{u'_i u'_j}) / \partial(\partial \bar{u}_i / \partial x_j) \Big|_*, \quad \varepsilon_{ij}'^* = \partial^2(-\overline{u'_i u'_j}) / (\partial(\partial \bar{u}_i / \partial x_j))^2 \Big|_*. \quad (3)$$

Величины  $\tau_{ij}^* / \rho$ ,  $\varepsilon_{ij}^*$ ,  $\varepsilon_{ij}'^*$  являются дифференциальными прототипами величин, известных в полуэмпирических теориях турбулентности /4/: динамическая скорость  $u_*$ , вихревая вязкость  $\varepsilon_{ij}^*$  ( $см^2 / с$ ), длина пути смещения  $l$  ( $см$ ) ( $\varepsilon_{ij}'^* = l^2$ ), а коэффициенты  $\varepsilon_{ij}'^*$  ( $см^2 / (l/c)$ ) – новые характеристики турбулентного потока в поле градиента скорости.

## 2. Аналитический вывод логарифмического закона турбулентного течения в пограничном слое и в трубах.

В теориях подобия и размерностей модели плоского течения в пограничных слоях построены без градиента давления в предположении /5/, что градиент скорости является функцией расстояния от стенки, касательного напряжения и плотности жидкости. Такие уравнения нетрудно получить из системы (2) /7-8/. В данном случае первым интегралом уравнения для случая течения жидкости между двумя параллельными стенками с учетом условия симметрии на оси потока, т.е. при  $u_z(0) = 0$ , будет уравнение

$$(v + \varepsilon_{xz}^*) u_z + \dots = -\varepsilon_{xz}'^* u_z^2 / 2, \quad (4)$$

Равенство (4) выполняется при следующих условиях:

$$u_z \equiv 0 \quad (4, \text{ а)}$$

а)

или

$$u_z = -2\theta(z), \quad (u_z < 0). \quad (\theta = (v + \varepsilon_{xz}^*) / \varepsilon_{xz}'^*)$$

(4, б)

Решением (4, а) будет  $u_1 = const. \neq 0$ , это означает, что поток движется как твердое тело или  $u_1 \equiv 0$  – находится в состоянии гидростатического равновесия. Из (4, б) следует линейная связь между частотой турбулентности  $\theta$  с градиентом скорости, и с учетом характера изменения градиента скорости в отрезке  $0 \leq z < R$  частоту представим в

виде  $\theta(\xi) = \theta_0 R / (R - z)$ . Тогда из (4, б) получим логарифмический закон профиля скоростей:

$$u_z - u_e = \theta_0 R \ln[(R - z) / \delta] \quad \text{и} \quad u_{\max} \equiv u_{\max}^0 - u_e = \theta_0 R \ln[R / \delta] \quad . \quad 0 \leq z \leq R - \delta \quad (5)$$

Здесь  $R = R_e + \delta$  – радиус канала;  $u_e = \sqrt{-u'w'}$  – динамическая скорость в точке  $z = R_e$  контакта ламинарного и турбулентного слоев движения,  $\theta_0$  – частота пульсации в точке  $z = 0$ ,  $2R_e$  и  $2\delta$  – турбулентный и ламинарный толщины потока. В частности, из уравнений (4)-(4, б) определяются такие характеристики турбулентности, как квадрат длины пути смешения  $l^2$  и частота турбулентности  $\theta$ , соответственно:

$$\varepsilon_{\text{чл}}^0 \equiv l^2 = 2(\nu + \varepsilon_{\text{чл}}^0) / |u_z| \quad \text{и} \quad \theta = |u_z| / 2. \quad (4, в)$$

На рис. 1 отражены профили скоростей течения воды в гладкой трубе ( $d = 1$  см): 1 – вихревая вязкость вычислена по формуле, приведенной в /7/, 2 – длина пути смешения  $l$  и 3 – частота турбулентности  $\theta$ , вычисленные по формуле (4, б).

Результаты, приведенные на рис. 1, свидетельствуют о том, что закон (5) с высокой точностью описывает данные измерения и с ростом  $l$  также наблюдается рост проникания турбулентного потока в глубь пограничного слоя.

### **3. Прикладные аспекты использования гидрологических данных речного бассейна Республики Таджикистан с учетом теоретических положений.**

Исследования анализа многолетних данных по зоне бассейна реки Амударья за промежуток времени 1961-1990 гг. привели к следующему выводу: на территории Республики Таджикистан формируется 90 % речного стока бассейна р. Амударья; факторы глобального и регионального изменения климата и локальные антропогенные источники воздействия на гидрометеорологические условия с различной активностью влияют на гидрологические процессы в разных высотных зонах бассейна.

За расчетный период 1961-1990 гг. в стокоформирующей зоне бассейна р. Амударья произошло сокращение среднего суммарного объема годового стока рек, формирующегося на территории Таджикистана, с  $57,3 \text{ км}^3/\text{год}$  до  $56,2 \text{ км}^3/\text{год}$ , т.е. на 2 %. Анализ материалов долгопериодных наблюдений (более 50 лет) не выявил существенного изменения в межгодовой и внутригодовой изменчивости стока главных рек бассейна р. Амударья, т.е. режим рек во второй половине XX в. здесь не менялся. Периоды повышенной и пониженной водности рек чередуются группами по 2-3 года; непрерывные периоды маловодья и многоводья продолжительностью 4-6 лет наблюдались в течение 1930-1990 гг. трижды; наиболее затяжные периоды маловодья достигают 8 лет, в целом количество лет с  $Q_i > Q_0$  на 2 % меньше количества лет с  $Q_i < Q_0$ .

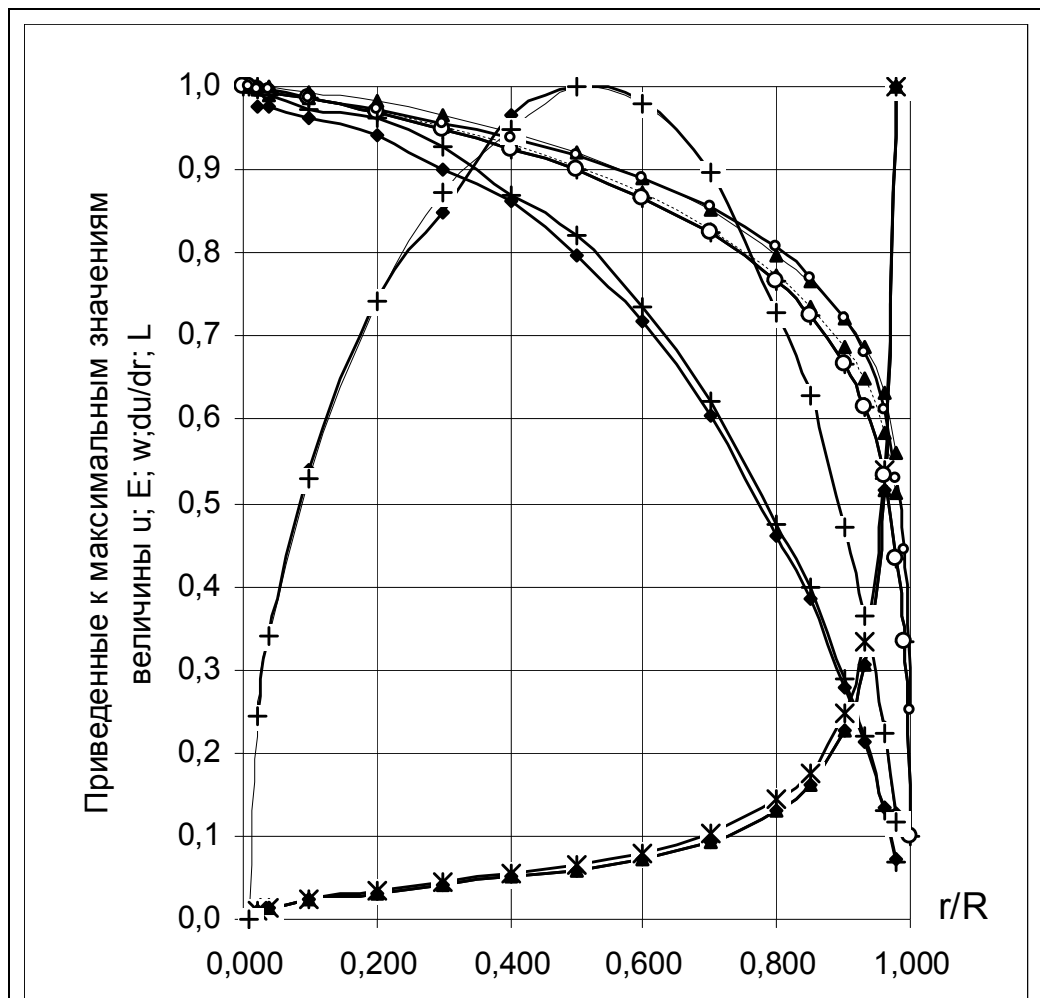


Рис. 1. Характеристики потока воды в трубе ( $d = 1$  см) при  $I = 0,0295$  и  $1,2550$ : опытные – значки  $\circ$ ; сплошные линии – по закону (5), при  $I = 0,0595$ ;  $1,255$  и  $R/\delta_1 = 1000$  и  $R/\delta_2 = 3000$ .

Прогнозируемое значительное потепление в первой половине XXI в. на  $+2^0$  С (HadCM-2) вызовет сокращение площади оледенения Памиро-Алая на 58 %, при этом ледниковое питание рек уменьшится на 45 %, а суммарный сток рек Зеравшан, Кафирниган, Вахш, Пяндж снизится с  $61,2 \text{ км}^3/\text{год}$  (норма стока в 1990 г.) до  $56,9 \text{ км}^3/\text{год}$ , или на 7,03 % в (2050 г.). Прогнозируемое увеличение годового количества осадков на 14-15 % к 2050 г. существенного влияния на изменение стока не окажет, так как дождевая доля этих осадков составит не менее 50 % и будет израсходована на испарение, инфильтрацию и другие потери. При потеплении произойдет значительная сдвигка характерных дат половодья на более ранние сроки и увеличение его продолжительности. Наибольшая сдвигка начала, пик половодья, и увеличение его продолжительности произойдет на реках ледниково-снегового питания: соответственно на 22-25 дн., 15-18 дн и 45-50 дн. На реках снегового и снего-дождевого питания при значительной сдвигке дат начало и пик половодья на 25-30 дн, продолжительность половодья уменьшится на 20-25 дн.

Прогнозы показывают, что снижение к 2050 г. общего объема годового стока рек Таджикистана на 7 % при фактической амплитуде его колебаний, равной  $+30\%$ ;  $-24\%$ , представляется несущественным. Вместе с тем, значительное сокращение ледникового стока и ослабление регулирующей роли ледников в летний период, сдвигка характерных дат половодья, негативно влияющие на наиболее уязвимые отрасли экономики, сельское хозяйство и гидроэнергетику, диктуют необходимость осуществления системы

адаптационных мероприятий, смягчающих неблагоприятные последствия изменения климатических условий.

В таблице приведены сведения об изменении средних многолетних характерных дат половодья и его продолжительности в среднем и нижнем течении главных рек. Наибольшие сдвиги во времени относятся к датам начала и продолжительности половодья. Продолжительность половодья увеличится за счет повышенного температурного фона перед началом и на спаде половодья на реках л.-с.п. (ледниково-снегового питания) на 30-50 дней, на реках с.-л.п. (снего-ледникового питания) – на 15-20 дней и на 8-10 дней на реках с.-л.п. Сдвигка пиков половодья на более ранние сроки также различна для рек л.-с. и с.-л. питания: соответственно на 15-25 и 7-10 дней.

На р. Вахш в створах пгт. Гарм и к. Комсомолабад незначительные сдвиги сроков начала половодья (7-9 дней) объясняются тем, что и в настоящее время здесь раннее начало половодья определяется повышенной боковой приточностью.

На реках снегового и снего-дождевого питания сдвигка начала половодья на более ранние сроки будет составлять не менее 25-30 дней, в среднем передвинется на середину января, но и продолжительность половодья уменьшится в среднем на 20-25 дней за счет более раннего стаивания сезонных снегозапасов в высотном поясе 2,5-3,5 км н.у.м.

Таблица 1

Изменение средних многолетних характерных

Река – участок	Средняя дата начала половодья		Средняя дата пика половодья		Средняя продолжительность половодья (дни)	
	1990 г.	2050 г.	1990 г.	2050 г.	1990 г.	2050 г.
1	2	3	4	5	6	7
Зеравшан – к. Худгиф	14-20. 04	20-25. 03 (25)	01. 08	13-15. 07 (16)	175-180	225 (45-50)
Зеравшан – м. Дупули	---	---	12. 07	25-28. 06 (17)	190	230 (40)
Ягноб – к. Такфон	---	---	24-30. 06	11-15. 06 (15)	175-180	225 (45-50)
Искандердарья – исток, устье	---	---	---	---	---	---
Кафирниган – к. Чинар	05-10. 03	27.02-02.30 (8)	20.05	01-05.05 (17)	205-210	225 (15-20)
Варзоб – к.Дагана	---	---	---	---	---	---
Кафирниган – к. Тартки	20. 02	10-10. 02 (10)	06. 05	25. 04 (10-11)	195	210 (15)
Вахш – пгт. Гарм	03. 04	27. 03 (7)	16-21. 07	05-10. 07 (11)	200	220 (20)
Вахш – к. Комсомолабад	25. 03	16-17. 03 (9)	---	---	210	235 (25)
Пяндж – к. Шидз	26. 04	10. 04 (16)	17-20. 07	05-06. 07 (14)	175	210 (35)
Гунт – г. Хорог	---	---	---	---	---	---
Бартанг – к. Шучанд	---	---	---	---	---	---
Пяндж – Нижний Пяндж	29. 03	05-10. 03 (22)	14. 07	25-27. 06 (18)	235	255 (20)

дат и продолжительности половодья

Наибольшие потери водных ресурсов происходят в орошаемом земледелии. По данным ПРООН из ежегодно забираемых из речной сети 11-12 км<sup>3</sup> воды 90 % расходуется в сельском хозяйстве, из них 40-50 % составляют непродуктивные потери в ирригационных системах и устаревших технологиях полива, увеличивая ирригационную эрозию и деградацию почв. Таким образом, ежегодные потери стока только в сельском хозяйстве в настоящее время составляют 4-5 км<sup>3</sup> и равны прогнозируемым к 2050 г. потерям речного стока вследствие неблагоприятного воздействия климатических условий. Следовательно, первоочередными и главными действиями в стратегии водосбережения должны стать адаптационные мероприятия в сельскохозяйственном водопользовании.

Первоочередным мероприятием по обеспечению гарантированных запасов водных ресурсов является создание гидроэнергетического комплекса на р. Вахш (Рогунская ГЭС и др.), водохранилища в единой системе с Нурекским будут осуществлять многолетнее регулирование р. Вахш.

При этих обстоятельствах расчеты по оценке влияния изменения климата на водные ресурсы горных озер указывают на возможные увеличения объемов крупных приточных озер высокогорья. При сценариях, предполагающих повышение температуры воздуха на 1-2 °С и рост атмосферных осадков на 7-10 %, увеличение приходных компонентов водного баланса озер над расходными (озер – Каракуль, Яшилькуль, Сарез, Зоркуль, Чатыркуль) в среднем в год ожидается на 6-10 %.

Таким образом, первоочередные адаптационные действия стратегии водосбережения и обеспечение гарантированных запасов водных ресурсов должны включать полную модернизацию сельскохозяйственного водопользования и завершение строительства комплекса крупных водохранилищ на р. Вахш, позволяющего осуществить многолетнее регулирование стока этой реки.

### **Список литературы**

1. Кочин Н.Е., Кибель И.А. и Розе Н.В. *Теоретическая гидромеханика. Ч. 2.* – М.: Гостехтеориздат, 1963. – 612 с.
2. Полубаринова-Кочина П.Я. *Теория движения грунтовых вод.* – М.: Наука, 1977. – 664 с.
3. Колмогоров А.Н. *Локальная структура турбулентности несжимаемой вязкой жидкости // Докл. АН СССР. – 1941. – Т.30. – № 4. – С. 299-303.*
4. Хинце И.О. *Турбулентность /Пер. с англ. под ред. Г.Н.Абрамовича.* – М.: Госиздат физ.-мат. литературы, 1963. – 680 с.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Механика сплошных сред. – 2-е изд. – М.: ГИТТЛ, 1953. – 788 с.*
6. Саттаров М.А. *Некоторые модели фильтрации в пористых средах // Докл. АН СССР. – 1972. – Т.203. – № 1. – С. 54-57.*
7. Саттаров М.А. *Докл. АН Республики Таджикистан. – Душанбе, 2006. – Т.49. – № 4. – С.321-327; – Т.50. – № 11-12. – С. 826-835.*
8. Саттаров М.А. *Гидромеханические аспекты изучения структуры турбулентного потока с поперечным сдвигом в каналах и пористых средах // Вісник Харківського національного університету. – Харків, 2009. – № 863. – С. 190-201.*