

**ЛИНЕЙНО-КОРРЕЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВОДНОГО БАЛАНСА  
КАК ОТРАЖЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ СТОКА****THE LINEAR CORRELATION MODEL OF WATER BALANCE  
AS A REFLECTION OF THE GENETIC THEORY OF FLOW**

*Рассмотрена взаимосвязь линейно-корреляционной модели водного баланса и генетической теории стока. Рассмотрены генетические виды склонового стока и их связь и выражение посредством параметров линейно-корреляционной модели. Представлено обоснование линейности зависимости речного стока от атмосферных осадков.*

*Interconnection of the linear correlation model of water balance and the genetic theory of flow is considered. Genetic types of the sheet flow and their connection and expression by the use of parameters of the linear correlation model are considered. Substantiation of linearity of dependence of the river runoff on the precipitation is presented.*

*Ключевые слова: уравнение водного баланса, параметры уравнения водного баланса, линейно-корреляционная модель водного баланса, генетическая теория стока, подвешенный склоновый сток, подпертый поверхностный склоновый сток, подпертый почвенный сток.*

*Key words: water balance equation, water balance equation parameters, linear correlation model of water balance, genetic theory of flow, perched sheet flow, backed-up surface sheet flow, backed-up ground flow.*

**Постановка проблемы**

Линейно-корреляционная модель водного баланса возникла из логического предположения о возможности получения некоторых водно-балансовых параметров при рассмотрении корреляционной зависимости речного стока от атмосферных осадков. Действительно, различие между величинами речного стока и выпадающими на водосбор атмосферными осадками обусловлено потерями как стока, так и атмосферных осадков. Формирование всех видов гидрологических характеристик на водосборе — атмосферных осадков, стока, потерь — имеет теоретическое обоснование. Поэтому при использовании значимой корреляционной зависимости величин речного стока от атмосферных осадков, выпадающих на водосбор, необходимо попытаться получить математические выражения для величин потерь.

Для этой цели предложена линейно-корреляционная модель водного баланса.

В качестве постановки проблемы при использовании линейно-корреляционной модели выступает правомерность использования линейной зависимости речного стока от атмосферных осадков. А также, что очень важно, физическая обоснованность модели с точки зрения существующих гидрологических закономерностей на основе генетической теории стока.

**Объекты и методы исследования**

В качестве объекта исследования рассмотрены линейно-корреляционная модель с линейной связью слоя стока со слоем атмосферных осадков, а также состав уравнения водного баланса с точки зрения его физической обоснованности. Коль скоро речь идет о линейности связи сток–осадки, принципиальным становится вопрос именно линейности этой связи. Этот аспект также является объектом исследования. И наконец, в качестве объекта исследования рассматривается параметр  $b$  и его связь с генетическими видами стока.

В качестве метода исследования в работе использован метод эмпирического уровня. К методу эмпирического уровня мы отнесли сравнение формальных признаков модели и физического содержания параметров модели, обоснованного теоретически.

*А. Корреляционные связи.*

Линейно-корреляционная модель водного баланса может применяться при значимой корреляционной связи слоя речного стока от слоя атмосферных осадков. Формально при использовании линейно-корреляционной модели возникают несколько проблем. Одна из них — это допущение о линейности связи речного стока от атмосферных осадков. Это допущение может быть подтверждено следующим логическим обоснованием.

Линейность корреляционной связи слоя стока от слоя атмосферных осадков в одном случае может нарушаться за счет более интенсивного нарастания стока, в другом, наоборот, — более интенсивного нарастания атмосферных осадков. Указанное одностороннее интенсивное нарастание одной из переменных при нормальном (естественном) изменении второй переменной как раз и вызывает несоответствие в форме рассматриваемой линии связи на графике. Так, в случае интенсивного нарастания речного стока со значениями, расположенными на оси ординат, и естественного изменения слоя атмосферных осадков, значения которого расположены на оси абсцисс, будет иметь место вогнутая кривая связи.

Выпуклой кривой в указанных координатах и рассмотренных переменных (сток и осадки), вероятно, не существует, так как при естественном изменении слоя стока трудно ожидать более чем наблюдаемое увеличенное значение атмосферных осадков. Увеличенные по сравнению с наблюдаемыми на метеорологической сети значения атмосферных осадков возможны только за счет искусственного их воспроизводства.

Возвращаясь к вогнутой кривой зависимости слоя речного стока от слоя атмосферных осадков, отметим, что сочетание исходных данных и такое их графическое представление маловероятно для естественных условий. Представляется, что нарушение линейности связи может быть связано с излишней неестественно завышенной величиной стока. Завышение величины стока по сравнению с их естественной величиной и величиной атмосферных осадков может быть вызвано дополнительным стоком.

В качестве дополнительного стока может появляться сток из поверхностных или подземных емкостей-хранилищ на водосборе либо перетекание объемов воды из соседних водосборов. Других причин просто нет. Такими источниками дополнительного стока могут быть подземные емкости на водосборе в виде карстовых образований или поверхностных источников аккумуляции в виде водохранилищ. Кроме того, источниками дополнительного стока могут быть слабо выраженные водоразделы, допускающие перетекание стока из одного водосбора в другой. Объемы перетекания условно могут быть отнесены также к емкостям на исследуемом водосборе.

Таким образом, естественный ход изменения речного стока и атмосферных осадков в виде прямой линии нарушают различного рода емкости на водосборе.

Рассматривая графики связи сток–осадки, необходимо отметить еще одну характерную особенность. Это положительное значение свободного члена  $b_3$  в уравнении прямой, связывающей рассматриваемые переменные (рис. 1). Свободный член уравнения при положительном  $b_3$  отсекает на оси ординат отрезок выше нулевой координаты по ординате.

Как показано в работе [4, с. 62–67], отрезок  $b$ , независимо от знака, характеризует суммарную величину впитывания за период водообразования и слой впитывания после конца стока за счет объемов воды, накопленных в понижениях. Последний иногда называют поверхностным задержанием стока на водосборе.

Отрезок  $b_3$  также характеризует слой впитывания, но еще до начала выпадения атмосферных осадков. Такой слой впитывания мог быть создан за счет подъема уровня грунтовых вод до дневной поверхности или до уровня, близкого к дневной поверхности. Других причин формирования слоя впитывания еще до выпадения атмосферных осадков, на наш взгляд, не существует.

В этом случае происходит так называемая пассивная аккумуляция — процесс, который входит в состав естественных условий формирования стока [1]. До процесса активного водообразования, когда появляется на поверхности водосбора микроручейковая сеть, формируется отрезок с отрицательным значением  $b_2$  в уравнении зависимости стока от осадков (рис. 2). С другой стороны, процесс водообразования может происходить и в условиях, когда уровень грунтовых вод находится вблизи дневной поверхности. Эти условия характеризуют заполненную емкость к началу водообразования и образуют отрезок зависимости стока от осадков с положительным значением свободного члена в уравнении прямой  $b_3$ .

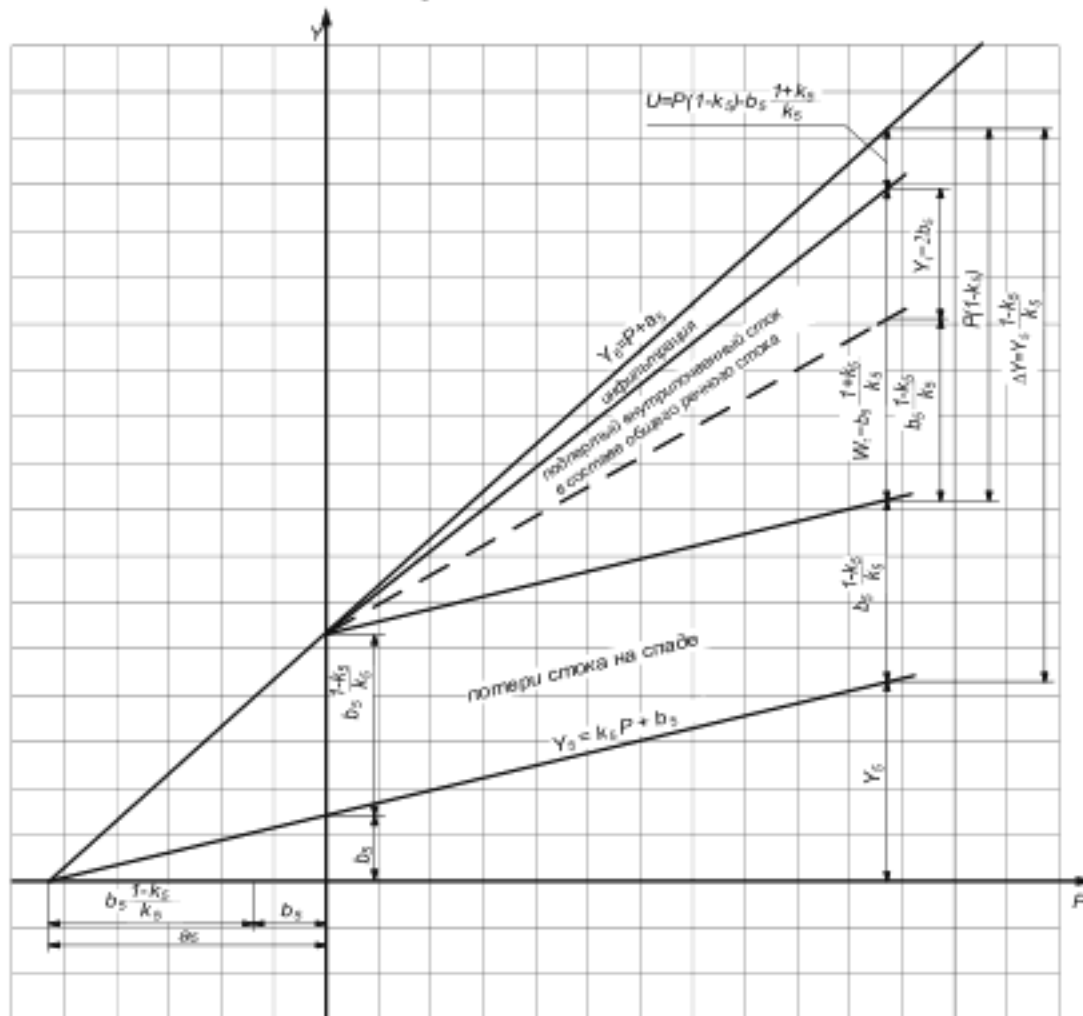


Рис. 1. Графическое изображение элементов водного баланса при положительном  $b$

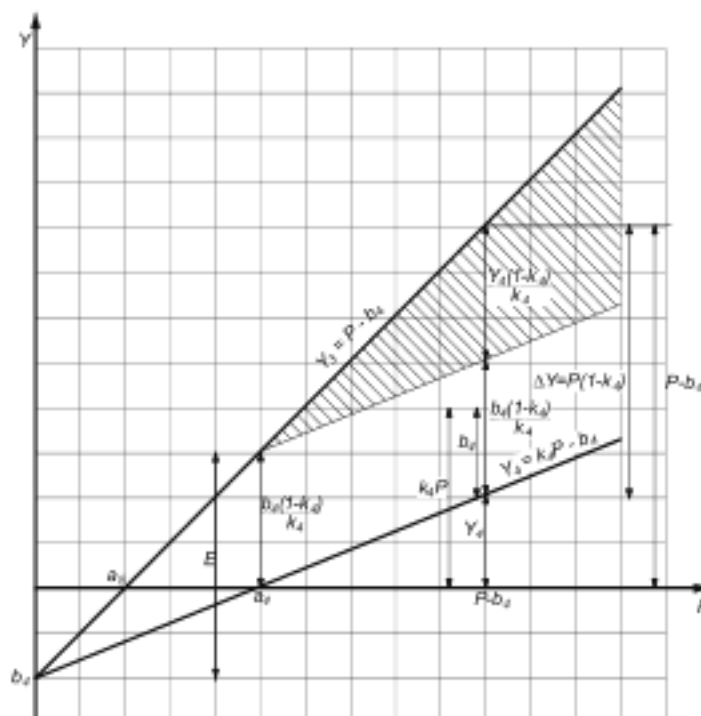


Рис. 2. Графическое изображение элементов водного баланса при отрицательном  $b$

При отрицательном  $b_4$  создаются условия для формирования водообразования в виде микроручейковой сети на поверхности водосбора. При этом происходит накопление слоя впитывания в толще почвогрунтов. При положительном  $b_5$  процесс водообразования происходит значительно быстрее, но, в отличие от наиболее распространенного в равнинных условиях подвешенного стока, возникает другой вид речного стока — подпертый внутрпочвенный сток.

Необходимо отметить, что параметр  $b$  отражает генетический вид склонового стока и никак не влияет на форму графика связи сток–осадки.

Говоря о линейной связи стока с осадками, авторы работы [5, с. 53–57] также считают такую зависимость линейной.

Коль скоро необходимо оперировать корреляционной зависимостью, возникает вопрос о качестве корреляционной связи: всегда ли эта связь оказывается удовлетворительной по тесноте расположения точек на графике. Иными словами, речь идет о значимости коэффициента корреляции. В работе [2] показано, что практически всегда значимая корреляционная зависимость может быть получена при использовании равнообеспеченных величин переменных.

#### *Б. Уравнение прямой линии как разновидность уравнения водного баланса.*

Отправной точкой для установления подобия двух уравнений — уравнения прямой и уравнения водного баланса — послужил вид этих двух уравнений [4]. Уравнение, связывающее сток  $Y$  и атмосферные осадки  $P$ :

$$Y_3 = P - b_4, \quad (1)$$

которое идентично уравнению водного баланса вида

$$Y = P - E, \quad (2)$$

где  $E$  — суммарное испарение с поверхности водосбора.

Оба уравнения, отражая водный баланс, являются уравнениями прямой.

Но недостатком водного баланса, выраженного прямыми 1 и 2, является недоучет некоторых видов потерь. Показать это можно, используя известное в гидрологии понятие стокообразующих атмосферных осадков  $P_{cr}$ . Стокообразующие осадки — это осадки, выпадающие с момента начала стока. Говоря об уравнении прямой (1) с коэффициентом регрессии  $k$ , равным 1, нужно сказать, что оно отражает скорее идеальные условия водного баланса, чем реальные. Это утверждение об идеальных условиях водного баланса следует из того, что сток не может быть равен выпадающим на водосбор атмосферным осадкам  $P_{cr}$ . А при  $k = 1$  имеет место равенство  $Y = P_{cr}$ . Поэтому реальный сток с водосбора и реальный водный баланс отражаются уравнением с  $k \leq 1$  [4]:

$$Y_4 = k_4 P \pm b. \quad (3)$$

Знак перед свободным членом  $b$  является показателем, отражающим генетический вид стока. В формуле (3), если под  $b$  иметь в виду  $b_4$ , то знак при  $b_4$  всегда отрицательный, а при  $b_5$  всегда положительный. Параметр  $b$  со своим знаком и соответствующий генетический вид стока рассмотрены ниже.

Как известно, речной сток с водосбора подразделяется на склоновый и русловой. Поскольку основную долю в стоке составляет склоновый сток, рассмотрим виды склонового стока.

Согласно генетической теории стока [1] разнообразные сочетания природных условий (климатических, геоморфологических, почвенных, геологических) создают достаточно большое качественное различие видов паводочного стока. В свою очередь серии паводочного стока создают значительную часть годового стока.

**Подвешенный поверхностный сток** является одним из них. Этот вид стока возникает за счет превышения интенсивности осадков над интенсивностью впитывания. Процесс образуется из первоначального накопления слоя впитывания в почву, когда интенсивность впитывания пре-

вышает интенсивность атмосферных осадков. С накоплением влаги в почве, снижением интенсивности впитывания и определенной интенсивности дождя происходит образование влаги на поверхности земли, формируется процесс водообразования, с накоплением которого появляется поверхностный сток. В результате образования предельной полевой влагоемкости в почве и продолжающегося дождя образованный поверхностный сток не имеет контакта с грунтовыми водами, а поэтому называется подвешенным.

**Почвенный сток равнин.** Этот вид стока образуется за счет более высокой проницаемости почв по сравнению с материнской породой.

**Подпертый поверхностный сток подтопляемых низменностей.** Образуется за счет неглубокого залегания грунтовых вод, поднимающихся до поверхности при обильных осадках.

**Подпертый почвенный сток равнин.** Возникает при подтоплении почвенных горизонтов грунтовыми водами. Этот вид стока связан с подпертым поверхностным стоком.

**Поверхностно-почвенный сток болотных массивов.**

Сток, осуществляемый как поверхностным путем во время паводков, так и почвенным путем во время межени не имеет большого веса в общем стоке, поскольку площади болот, как правило, ограничены.

**Контактный сток с горных склонов.** Возникает в рыхлом слое почвогрунтов по контакту с подстилающим водоупором.

**Подпертый поверхностный сток с горных склонов.** Сток, гидравлически связанный с контактными.

### *Результаты исследования и обсуждение*

Указанные виды склонового стока возникают при определенных физических процессах, происходящих на водосборе. С точки зрения генетической теории формирования речного стока [1] рассмотренный ранее вариант с отрицательным  $b_4$  физически отражает подвешенный поверхностный сток, возникающий за счет поверхностного водообразования. Под поверхностным водообразованием понимается избыток интенсивности дождя над интенсивностью поверхностных потерь. Этот вид стока не связан с залегающим глубоко уровнем грунтовых вод. Он как бы подвешен в почвенном слое.

Положительное значение  $b_5$  обязано своим происхождением существующему перед началом стока зааккумулированному объему воды на водосборе. Этот объем может быть создан как в емкости почвогрунтов, так и в емкости водохранилищ на водосборе. Отсюда и положительное значение  $b_5$ , то есть до начала стока в почве водосбора уже есть некоторый объем воды. В связи с этим возможно сочетание подпертого поверхностного стока и подпертого почвенного стока (внутрипочвенного) либо только внутрипочвенного стока. Подпертый почвенный сток осуществляется внутрипочвенным путем, за счет сравнительно большого объема воды в почве.

Итак, уравнение (3) в качестве уравнения водного баланса отражает большинство видов склонового стока, характерных для равнинных рек. На основе уравнения (3) разработана линейно-корреляционная модель водного баланса [4].

Используя уравнение прямой линии (3), по модели получены такие элементы водного баланса, как впитывание за период водообразования, поверхностное задержание стока на водосборе, потери стока на спаде половодий и паводков после окончания водообразования, слой инфильтрации, слой суммарного испарения, слой испарения с водной поверхности. Кроме этого, при высоком стоянии уровня грунтовых вод модель позволяет определить внутрипочвенный сток.

Покажем основные зависимости линейно-корреляционной модели, по которой могут быть получены перечисленные выше водно-балансовые характеристики. Полностью доказательство и вывод зависимостей приведены в [4].

Параметр уравнения  $b_4$  отражает суммарное впитывание за период водообразования, а также впитывание после окончания стока за счет объема воды, оставшейся в замкнутых понижениях,

то есть аккумуляцию выпадающих осадков в понижениях до начала и после окончания водообразования.

Коэффициент регрессии  $k_4$  показывает долю атмосферных осадков, идущих на водообразование и сток.

В работе [2] показано, что

$$a_4 = b_4 + b_4 \frac{1-k_4}{k_4} = E \quad (4)$$

представляет суммарное испарение, а

$$Y_4 \frac{1-k_4}{k_4} = U \quad (5)$$

— слой инфильтрации.

Если следовать уравнению водного баланса в составе [4]:

$$P = Y + E + U, \quad (6)$$

то будет интересен вопрос о том, будет ли получен баланс из параметров линейно-корреляционной модели.

В уравнении (6)  $E$  — суммарное испарение с речного бассейна за вычетом конденсации;  $U$  — слой инфильтрации в подземные воды;  $Y$  — слой речного среднегодового стока.

Итак,

$$\begin{aligned} P &= Y_4 + b_4 + b_4 \frac{1-k_4}{k_4} + Y_4 \frac{1-k_4}{k_4} = \frac{Y_4 k_4 + b_4 k_4 + b_4 (1-k_4) + Y_4 (1-k_4)}{k_4} = \\ &= \frac{Y_4 k_4 + b_4 k_4 + b_4 (1-k_4) + Y_4 (1-k_4)}{k_4} = \frac{Y_4 k_4 + b_4 k_4 + b_4 - b_4 k_4 + Y_4 - Y_4 k_4}{k_4} = \\ &= \frac{b_4 + Y_4}{k_4} = \frac{b_4 + k_4 P - b_4}{k_4} = P. \end{aligned} \quad (7)$$

В результате нами получено тождество.

Рассмотрим зависимости для водно-балансовых параметров, полученных по линейно-корреляционной модели при положительном  $b_5$ .

Само значение  $b_5$  не меняет физического смысла, поскольку не имеет значения, когда заполнены почвогрунты: до начала водообразования или в процессе водообразования. Это накопленные слои впитывания за период водообразования и слои впитывания после окончания стока за счет объемов воды, оставшихся в замкнутых понижениях.

Суммарное испарение также не меняет структуры своего математического выражения и равно

$$a_5 = E = \frac{Y_5}{k_5} - P = \frac{Y_5 - k_5 P}{k_5} = \frac{b_5}{k_5} = b_5 + b_5 \frac{1-k_5}{k_5}. \quad (8)$$

Проверим соответствие указанных балансовых составляющих слою атмосферных осадков: Суммарное испарение также не меняет структуры своего математического выражения и

равно

$$a_5 = E = \frac{Y_5}{k_5} - P = \frac{Y_5 - k_5 P}{k_5} = \frac{b_5}{k_5} = b_5 + b_5 \frac{1-k_5}{k_5}. \quad (9)$$

Единственный параметр, которого коснулось изменение, — это слой инфильтрации. Выражение приобрело следующий вид:

$$P(1 - k_5) - b_5 \frac{1 + k_5}{k_5} = U \text{ — инфильтрация.} \quad (10)$$

Проверим соответствие указанных балансовых составляющих слою атмосферных осадков:

$$\begin{aligned} P &= Y_5 + b_5 + b_5 \frac{1 + k_5}{k_5} + \left[ P(1 - k_5) - b_5 \frac{1 + k_5}{k_5} \right] = \\ &= Y_5 + b_5 + b_5 \frac{1 - k_5}{k_5} + P(1 - k_5) - b_5 \frac{1 + k_5}{k_5} = \\ &= b_5 + b_5 \left( \frac{1 - k_5}{k_5} - \frac{1 + k_5}{k_5} \right) + P - k_5 P = \\ &= Y_5 + b_5 - 2b_5 + P - k_5 P = Y_5 - b_5 + P - k_5 P = Y_5 - Y_5 + P. \end{aligned}$$

Таким образом, мы получили тождество.

### Заключение

Итак, рассмотрено уравнение прямой 3 и зависимости для водно-балансовых параметров, выведенных на основе линейно-корреляционной модели и уравнения (3).

Как и следует из теории стока, суммарное впитывание в почву  $b_4$  определяет процессы суммарного испарения и стока. Кроме того, изменение коэффициента регрессии  $k_4$  отражает нарастание слоя инфильтрации при уменьшении  $k_4$  или снижение слоя инфильтрации при увеличении  $k_4$ .

Измененное математическое выражение для слоя инфильтрации при  $b_5$  по сравнению с выражением при  $b_4$  физически оправдано. Различие в математических выражениях вызвано тем, что при высоком стоянии уровня грунтовых вод процесс инфильтрации существенно отличается от процесса при глубоком залегании грунтовых вод.

Зависимости получены для ряда видов склонового стока, что объединяет идею линейно-корреляционной модели с генетическими видами стока. Важным в полученных зависимостях является охват не только подвешенного склонового стока, характерного для отрицательного значения  $b_4$ , но и подпертых поверхностного и почвенного стока. Последние виды стока отражаются в положительном значении  $b_5$ .

Отмеченные зависимости для водно-балансовых элементов совместно с математическим выражением для внутрипочвенного стока получены впервые и адекватно отражают физические процессы, происходящие на водосборе.

### Список литературы

1. Бефани А. Н. Вопросы региональной гидрологии. Паводочный сток: учеб. пособие / А. Н. Бефани. — Киев: УМК ВО, 1989. — 132 с.
2. Великанов М. А. Водный баланс суши / М. А. Великанов. — М.: Гидрометеиздат, 1940. — 140 с.
3. Великанов М. А. Ошибки измерения и эмпирические зависимости / М. А. Великанов. — Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1962. — 303 с.
4. Иофин З. К. Новый подход к определению составляющих водного баланса / З. К. Иофин // Тр. VI Всесоюз. гидрологического съезда. Секция 3. — Л.: Гидрометеиздат, 2008. — Ч. 1.

5. Исмаилов Г. Х. Исследование водного баланса речных бассейнов: основные проблемы и возможные решения / Г. Х. Исмаилов, В. М. Федоров // Тр. VI Всесоюз. гидрологического съезда. Секция 3. — Л.: Гидрометеиздат, 2008. — Ч. 1.

6. Оппоков Е. В. Осадки, сток и испарение в бассейне Днепра выше Киева (по новейшим данным) / Е. В. Оппоков // Исследование рек СССР. — 1935. — Вып. 7. — С. 38–54.

УДК 539.3

Д. П. Голоскоков,  
д-р техн. наук, профессор,  
СПГУВК

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВОДОУДЕРЖИВАЮЩЕЙ ОБШИВКИ СЕГМЕНТНОГО ЗАТВОРА В ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ

### ANALYTICAL CALCULATION OF A WATER-RETAINING COVERING OF A SEGMENT LOCK OF HYDRAULIC ENGINEERING CONSTRUCTIONS

*Водоудерживающая обшивка сегментного затвора моделируется пологой цилиндрической оболочкой, подкрепленной стрингерами. Получено аналитическое решение задачи деформирования поперечной нагрузкой пологой цилиндрической оболочки, подкрепленной ребрами жесткости вдоль образующей. Решение основного разрешающего уравнения теории ребристых пологих оболочек относительно комплексной функции представлено в виде ряда по комбинациям регулярных и специальных разрывных функций, что приводит к быстро сходящимся рядам и простому вычислительному алгоритму.*

*The water-retaining covering of a segment lock is modeled by the flat cylindrical cover supported with stringers. The analytical solution of a problem of deformation is received by cross-section loading of the flat cylindrical cover supported with edges of rigidity along forming. The solution of the basic equation of the theory of flat shells with ribs concerning complex function is presented in the form of a series from combinations of regular and special discontinuous functions. This solution leads to quickly converging series and simple computing algorithm.*

*Ключевые слова: теория пологих ребристых оболочек, цилиндрическая оболочка, разрывные функции.*

*Key words: theory of flat shells with ribs, cylindrical shell, discontinuous functions.*

**1. Введение.** На рис. 1 приведен вариант конструктивной схемы сегментного затвора с использованием выпуклой цилиндрической обшивки. Аналогичная конструкция исследовалась при проектировании конструкции сегментного затвора для нижней головы судоходного шлюза гидроузла № 10 «Тришин» (Республика Беларусь) в связи с необходимостью замены старого затвора.

Материал металлоконструкции сегментных ворот — сталь 09Г2С, имеющая следующие характеристики согласно [1]: модуль упругости  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ .

Сегментный затвор представляет собой сложную пространственную конструкцию, напряженно-деформированное состояние которой можно определить в настоящее время (в связи с широким внедрением в инженерную практику вычислительной техники) эффективным приближенным методом решения задач механики — методом конечных элементов (МКЭ).

На обшивку затвора действует гидростатическое давление; треугольная эпюра интенсивности этого давления схематично показана на рис. 1 для напора  $h = 5,5$  м. В расчетной схеме МКЭ цилиндрическая поверхность обшивки заменяется ломаной поверхностью с прямолинейными участками между соседними узлами обшивки по высоте затвора. Соответственно треугольная