

М. И. Тер-Аствацатрян

О законе площадей при движении жидкости на поворотах открытых водоводов

Движение жидкости на повороте потока представляет собой одно из наиболее часто встречающихся явлений природы. Вследствие сложности, вопрос о том, как движется вода на повороте русла не только не решен, но даже до сих пор нет общепринятой схемы, объясняющей закономерность этого явления. Этим вопросом занимались многие исследователи: Милович [1], Потапов [2], Кожевников [3], Шукри [4] и др. Их выводы существенно расходятся между собой и не соответствуют фактическим условиям движения жидкости в натуре. Имеются работы, в которых авторы доводят решение задачи до конца благодаря введению ряда допущений. Но эти допущения мало соответствуют действительным условиям движения жидкости на поворотах.

Экспериментально рассматриваемое явление было исследовано Миловичем, Потаповым, Кожевниковым, Шукри и др. Несмотря на многочисленные опытные данные, вопросы о кинетической структуре потока остаются не выясненными, так как в большинстве экспериментов, кроме опытов проф. Потапова и Шукри, изучались линии тока и скорости в поверхностных и донных струях и не изучались промежуточные зоны потока.

Основными вопросами, подлежащими освещению при изучении движения жидкости на повороте, должны быть: поперечная циркуляция, закономерность изменения отдельных компонентов скоростей и их взаимосвязь. Большинство исследователей принимает, в качестве исходного положения, что распределение продольных составляющих скоростей происходит по закону площадей, т. е. что их изменение по ширине потока следует гиперболе.

Это положение имеет существенное значение для выбора направления дальнейшего теоретического исследования вопроса. Если закон площадей действительно имеет место для всех радиальных сечений на повороте, то необходимо еще экспериментально доказать, что можно при этом поток считать потенциальным по всему сечению. Только в этом случае можно применять при исследовании теорию потенциального движения.

Потенциальный поток изучен хорошо и его уравнения имеют конечные математические решения.

Поскольку „закон площадей“ является одним из исходных положений для теоретического исследования движения при изгибе потока, то естественно, что задачей новых экспериментов должно было стать выяснение этого вопроса при изучении потока по всей глубине. С этой целью в Гидроэлектрической лаборатории (ГЭЛ) Водно-Энергетического Института Академии Наук Армянской ССР с 1949 года под руководством к. т. н. А. К. Аняняна были поставлены гидравлические исследования на поворотах открытого канала. Исследования были проведены с целью выяснения кинематической картины явлений на изгибе потока как на повороте, так и на подводящем и отводящем участках канала.

Эксперименты были выполнены на моделях с различными углами поворота и различными радиусами закругления. Большинство же авторов проводило исследования только на моделях с поворотом 180° и законы, выведенные для последних, механически распространяло на закругления с меньшими углами поворота.

Описание модельной установки ГЭЛ и методика экспериментирования

Эксперименты проводились в ГЭЛ на двух моделях, специально построенных для этой цели. Одна модель представляла поворот на 180° , другая на $67^\circ 30'$. Исследования велись при 3-х расходах: $Q=25,6$ л/сек., 16 л/сек., и 9,9 л/сек.

Первая модель состояла из деревянного, прямолинейного подводящего лотка длиной 9,8 м и отводящего лотка длиной 8 метров. К подводящей части примыкало закругление с углом поворота 180° .

Отношение радиуса закругления к ширине лотка равнялось $\frac{r_{\text{ос}}}{b} = 1,52$ (рис. 1). Вторая модель состояла из подводящего прямолинейного участка длиной 4 м и закругления с углом поворота в $67^\circ 30'$ и отношением радиуса к ширине $\frac{r_{\text{ос}}}{b} = 5,7$ и отводящей части длиной 4 метра (рис. 2). Назначение подводящих участков моделей заключается в выравнивании неравномерности распределения скоростей, а отводящих участков—в уменьшении влияния кривой спада.

Отводящие и подводящие участки были выполнены достаточно длинными для того, чтобы в дальнейшем можно было исследовать влияние поворота на кинематику потока на вышеуказанных участках модели.

Подвод воды к модели осуществлялся при помощи питательного бака с водосливом Томсона и целой системы гасителей для успокоения поступающей в бак и вытекающей из него воды.

Лотки были деревянные, шириной 38,4 см, высотой 20 см. Ук-

лоны лотков $i = 0,0007$. Для соблюдения одинаковой шероховатости лотки были покрыты масляной краской. Гидростатическое давление на дно и на стенки лотка измерялось при помощи пьезометров. По высоте стенки лотка было поставлено 4 пьезометра и 3—на дне лотка.

Горизонты свободной поверхности измерялись при помощи тастеров, передвигающихся по горизонтально установленной металлической раме. Линии тока фиксировались фотографированием светящихся поплавков. Кроме того, закреплялись тонкие нити на разных глубинах потока (примерно через каждые 1,5 см по глубине) и фотографировалось положение этих нитей при трех разных расходах.

Измерения всех компонентов скорости производились в 16 сечениях шаровым зондом через 5 см по ширине потока и через каждые 2 см по глубине потока.

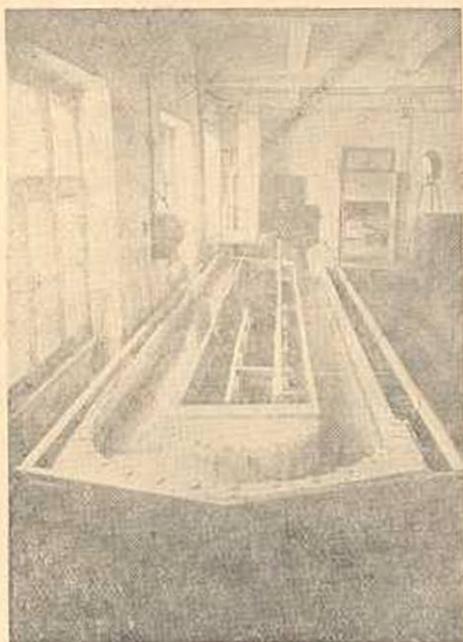


Рис. 1. Общий вид модели с 180° поворотом

Результаты экспериментов и сравнение их с данными, полученными различными исследователями

Произведенные эксперименты дали возможность определить направление и величину трех компонентов скоростей направленных: по радиусу (v_y), по вертикали (v_z) и нормально к первым двум направлениям (v_x).

Обработанные результаты этих экспериментов представлены на рис. (3, 5, 7) для поворота 180° и на рис. (4, 6, 8) для поворота в 67° 30'.

На рисунках (3) и (4) представлены эпюры продольных составляющих скоростей v_x по ширине потока для разных глубин. Там же изображена теоретическая кривая, построенная по формуле $v_x = C_{(const)}$.

После анализа данных рис. (3) можно прийти к выводу, что удовлетворительное совпадение экспериментальных данных с теоретическими подсчетами (для модели с поворотом в 180°) получается в первой половине поворота в сечениях, соответствующих углам 10°, 45° и 90°, причем хорошее подтверждение закона площадей получается не только для донных и поверхностных скоростей, как это было получено предыдущими исследователями, а для любой точки

радиального сечения поворота. Несколько хуже соблюдается закон площадей во второй половине закругления, в сечениях, соответствующих углам 135° и 180° . Здесь расхождения опытных данных с теоретическими подсчетами достигают 15% . Аналогичные опыты были

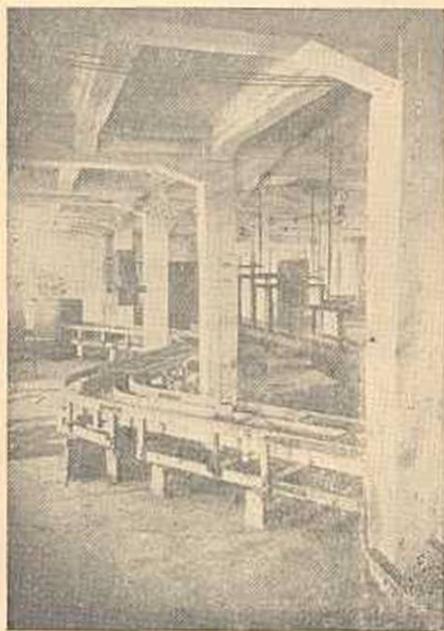


Рис. 2. Общий вид модели с $67^\circ 30'$ поворотом

проведены на модели с поворотом $67^\circ 30'$. Результаты этих опытов изображены на рис. 4. Из анализа данных этих опытов видно, что закон площадей в этом случае также действителен во всех точках потока, за исключением конечных сечений поворота, где процент расхождения между теоретическими и экспериментальными данными местами достигает 20% .

Кожевников, на основании своих экспериментов, пришел к выводу, что закон площадей имеет место для всего потока, только уравнение $v \cdot r = \text{const}$ радиус, входит не в первой степени, а в степени $1/2$. Шукри, на основании своих экспериментов, показывает, что закон площадей справедлив не для всех углов

поворота потока. Закон площадей по мнению Шукри действителен для поворотов от 90° до 180° ; для углов же меньших 90° в уравнение закона площадей необходимо вводить поправочный коэффициент.

Данные экспериментов ГЭЛ без введения поправок Шукри (для $67^\circ 30'$) и Кожевникова (для 180°) достаточно хорошо согласуются с подсчетами по формуле $v \cdot r = \text{const}$. Отсюда следует, что введение указанных поправок излишне (см. табл. 1 и 2).

Для тех участков, где закон площадей соблюдается менее точно, введение вышеуказанных поправок заметного уточнения не дает.

Таким образом, на основании произведенных опытов можно утверждать, что закон площадей при $Q = 25,6$ л/с, 16 л/с и $9,9$ л/с и при $\frac{y}{b} = 0,42 - 0,3$ (y —глубина потока) соблюдается для всех точек радиальных сечений поворота с точностью до 7% , за исключением конечных сечений, где $\%$ расхождения получается большой и достигает в среднем $15\% - 20\%$, а также за исключением пограничных слоев боковых стенок водовода, где скорость должна быть равна 0.

Для установления влияния поворота на перераспределение продольных компонентов скоростей на самом повороте и в подходах к

Таблица I

Подсчет скоростей v_x с введением поправки Шукри в данные ГЭЛ

Угол поворота в градусах	Глубина воды, считан от дна в см	Радиус повор. сечения см	v_x эксп. см/сек.	v_x теор. по формуле	Сер. для каждой глубины сечения	v_x средн. скорость сечений	Постоянная Шукри	r/c	$v_x = \frac{c}{r}$
16°52'	2	183	43,2	43,4	7900	40,93	0,951	43,5	41,4
		190	45,9	41,7			1,026	41,8	43,0
		200	43,5	39,8			0,974	39,8	38,8
		210	36,4	37,8			1,057	37,8	40,0
		217	32,2	36,6			1,089	36,7	39,8
33°45'	2	183	40,2	43,0	7900	38,43	0,924	43,0	40,0
		190	45,7	41,5			0,950	41,5	39,4
		200	45,6	39,5			0,980	39,5	34,3
		210	35,4	37,6			0,953	37,6	35,8
		217	31,3	36,4			1,040	36,4	38,0
50°37'	2	183	43,6	47,6	8740	38,51	0,925	47,6	44,0
		190	46,3	46,0			0,938	46,0	43,2
		200	45,6	43,6			0,955	43,7	41,8
		210	42,2	41,5			0,968	41,5	40,6
		217	40,6	40,6			0,990	40,0	39,7
67°30'	2	183	45,1	50,6	9260	40,44	0,813	50,5	41,0
		190	46,9	48,6			0,958	48,7	46,6
		200	50,5	46,2			0,969	46,3	44,8
		210	43,6	44,0			0,980	44,0	43,0
		217	43,6	42,2			0,990	42,6	42,2

нему в ГЭЛ (на указанных выше моделях) были поставлены специальные опыты. Произведенные эксперименты имели целью выяснить — насколько нормальные эпюры продольных скоростей на прямолинейном участке видоизменяются при переходе на участок поворота.

Полученные эпюры распределения продольных скоростей представлены на рис. 5 и 6.

Анализ указанных эпюр дает возможность сделать следующие выводы. Характер эпюры распределения скоростей по глубине потока незначительно меняется на протяжении всей модели, т. е. подводящего и отводящего лотка и поворота. Правда, на поворотах происходит некоторое перераспределение скоростей, но это наблюдается в основном в придонных слоях, благодаря чему продольные составляющие скоростей на поворотах с достаточной для практики точностью можно считать постоянными по глубине потока. Опыты, произведенные в ГЭЛ показали также, что соблюдение закона площадей для продольных составляющих скоростей не дает еще основания считать движение потенциальным (не вихревым) по всему се-

Таблица 2

Введение поправки в опытные данные ГЭЛ
по Кожевникову

№ п/п	Угол поворо- та се- чений	v_x эксп. см/сек.	Радиус точки г.см	V_{Γ}	$C = v_x V_{\Gamma}$	C ср.	v_x по Ко- жевникову	z	v_x теор.
1	10°	46,6	42,2	6,49	302	302	46,6	2	54,5
2		44,9	49,2	7,5	312		43,2		46,8
3		44,3	59,2	7,7	342		39,2		38,8
4		37,5	69,2	8,3	312		36,4		33,4
5	45°	27,6	76,2	8,72	242	321	34,7	—	30,1
6		56,2	42,2	6,49	364		49,6		57,6
7		52,0	49,2	7,0	363		45,8		49,1
8		43,8	59,2	7,7	336		41,8		41,0
9		36,4	69,2	8,3	302		38,6		35,0
10	90°	27,9	76,2	8,72	243	323	36,8	—	31,8
11		53	42,2	6,49	343		49,8		58,2
12		50	49,2	7,0	350		46,1		50,0
13		44,5	59,2	7,7	343		42,0		41,5
14		35,4	69,2	8,3	294		38,9		35,6
15	135°	33,2	76,2	8,72	288	339	36,2	2	32,2
16		56,4	42,2	6,49	365		52,3		61,0
17		51,6	49,2	7,0	361		48,4		52,5
18		44,7	59,2	7,7	341		44,0		43,5
19		40,4	69,2	8,3	335		40,8		37,2
20	180°	33,8	79,2	8,72	297	333	38,8	—	33,9
21		49,0	42,2	6,49	318		51,4		61,0
22		43,4	49,2	7,0	304		47,6		52,0
23		44,4	59,2	7,7	342		43,1		43,2
24		42,6	69,2	8,3	354		40,2		37,0
25		40,0	76,2	8,72	349		38,2		33,6

чению потока. Как известно, проф. Милович [1], принимая поток потенциальным на основании теории „Источник пары“, приходит к конечным выражениям для компонентов скоростей. Однако, результаты опытов, проведенных в ГЭЛ (см. табл. 3) и некоторыми исследователями, не подтверждают выводов проф. Миловича. В своих более поздних работах проф. Милович [5], рассматривая движение жидкости на поворотах как вихревое, приходит к синусоидальному виду эпюры продольных составляющих скоростей, что, как видно из опытов ГЭЛ, также не соответствует действительности (рис. 5 и 6).

Причина расхождений заключается в том, что проф. Милович рассматривает движение жидкости на поворотах как винтовое, при котором линии тока и вихри совпадают, причем соблюдается постоянство соотношения между компонентами вихрей и скоростей согласно нижеприведенному уравнению однородного винтового движения:

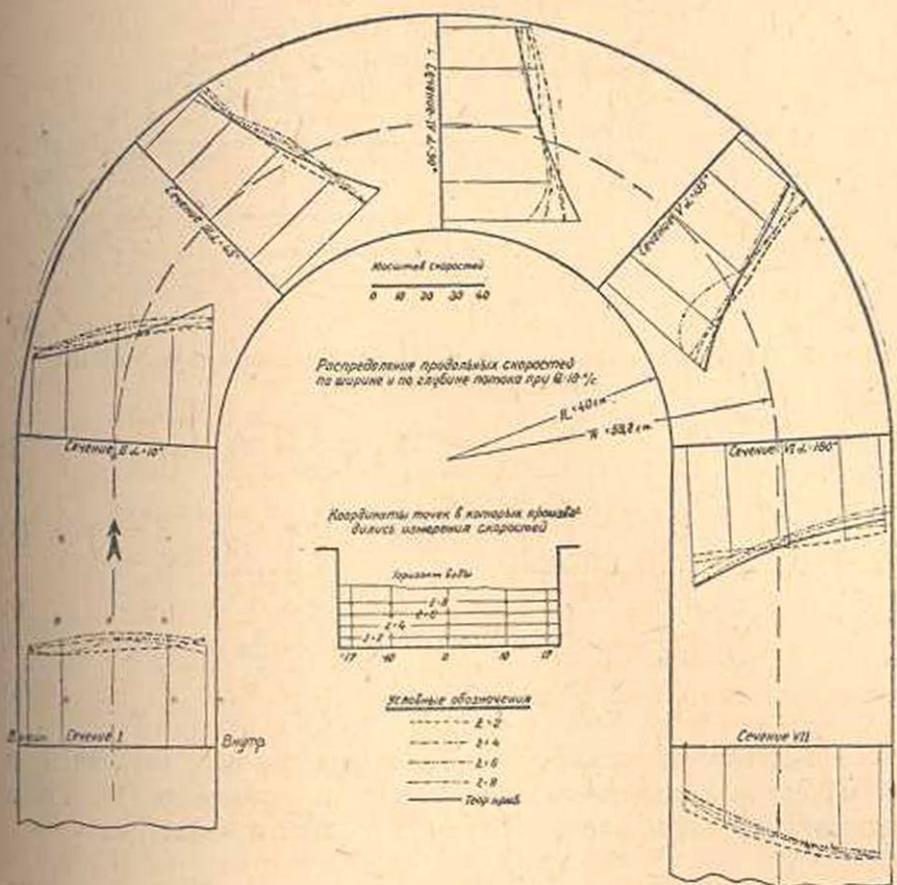


Рис. 3. Распределение продольных скоростей по ширине и по глубине потока при ($Q = 16 \text{ л/с}$)

$$\frac{\xi}{v_x} = \frac{\eta}{v_y} = \frac{\zeta}{v_z} = K \quad (1)$$

Это допущение является исходной предпосылкой для дальнейшего изучения кинематической и динамической картины движения потока на поворотах. Действительно, на основании этого допущения легко получаются следующие системы уравнений для компонентов вихря.

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} &= K v_x, \\ \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} &= K v_y, \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} &= K v_z, \end{aligned} \quad (2)$$

которые для плоского потока легко приводятся к виду:

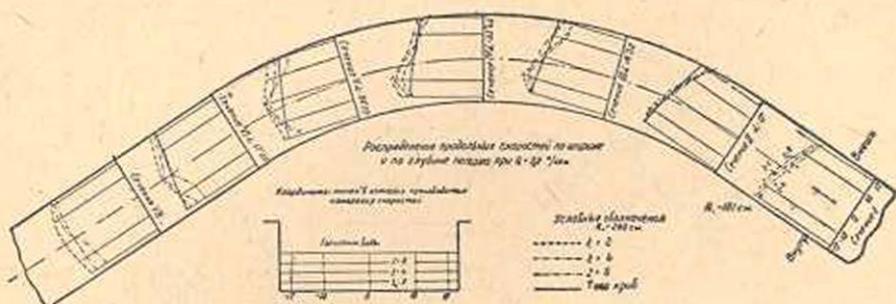


Рис. 4. Распределение продольных скоростей по ширине и по глубине потока при $Q = 16 \text{ л/с}$.

$$\frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} = K v_x \quad (3)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial z} = K v_y \quad (4)$$

$$-\frac{\partial v_x}{\partial y} = K v_z \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} + K^2 v_x = 0 \quad (6)$$

т.е. к волновому уравнению, математически хорошо изученному и интегрируемому в конечном виде. Интеграл уравнения (6) и дает синусоидальный закон распределения скоростей и имеет вид:

$$v_y = C \sin \frac{n\pi}{a} zy \left(\frac{m\pi}{b} r \right) \quad (7)$$

Остальные компоненты скоростей легко определяются из уравнения (4 и 5)

$$v_x = -C \frac{n\pi}{ak} \cos \frac{n\pi}{a} zy \left(\frac{m\pi}{b} r \right) \quad (8)$$

$$v_z = C \frac{m\pi}{bk} \sin \frac{n\pi}{a} zy \left(\frac{m\pi}{b} r \right), \quad (9)$$

где $y, \left(\frac{m\pi}{b} r \right)$ — бесселевы функции первого порядка.

Ниже мы увидим, что уравнения (8) и (9) также не подтверждаются опытами ГЭЛ (рис. 7 и 8).

Вышеуказанные недостатки теории проф. Миловича в некоторой степени устранены проф. Потаповым [2], который разработал теорию так называемого продольно-винтового движения. Эта теория отличается от однородно-винтового движения проф. Миловича тем, что здесь принимается постоянство по глубине потока продольных составляющих скоростей, т. е. $v_x = \text{const}$.

Распределение продольных скоростей V_x
по глубине потока при $Q = 25 \text{ л/с}$

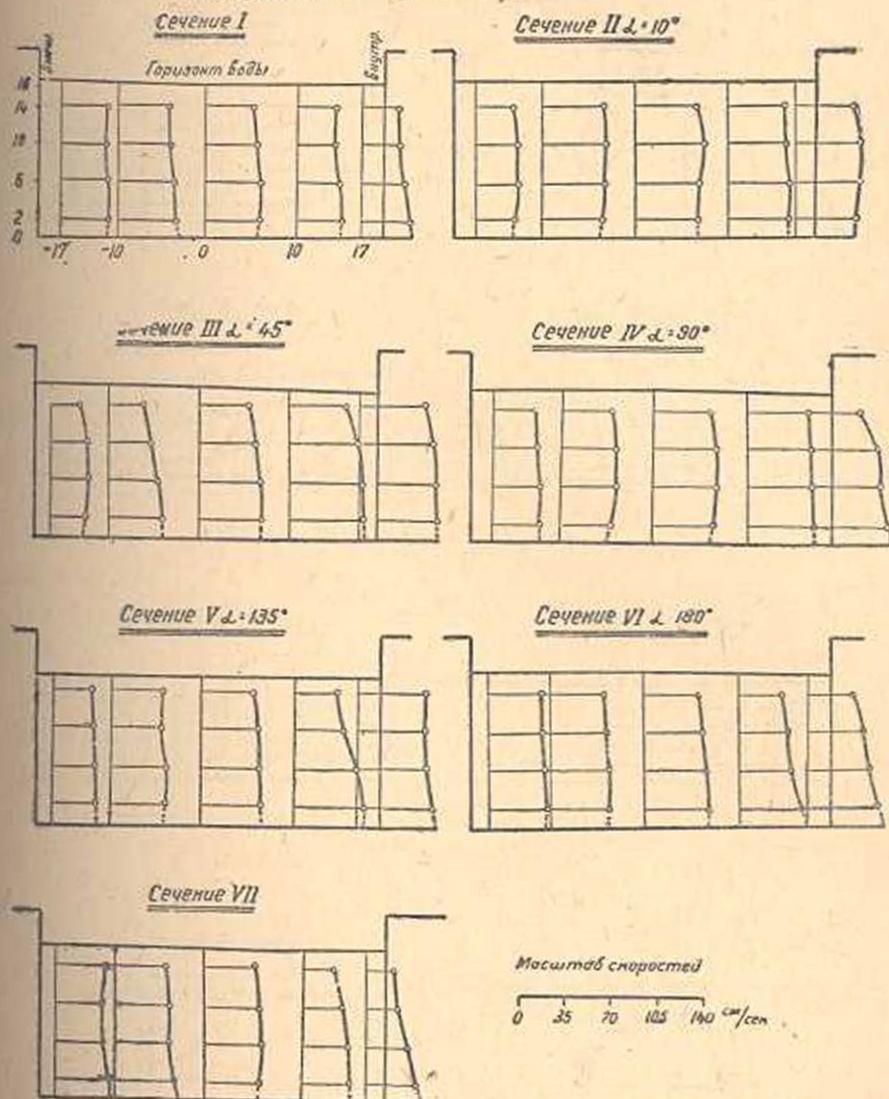


Рис. 5а. Распределение продольных скоростей по глубине потока при $Q = 25 \text{ л/с}$

Правда, такое допущение вполне соответствует реальным условиям движения жидкости, - однако принципиальная неправильность теории проф. Миловича при этом сохраняется. Основная же неточность теории проф. Потапова заключается в том, что в ней используется уравнение (1), которое аналогичным образом (как у проф. Миловича)¹ приводит к следующим выражениям для компонентов скоростей

¹ Теория однородно-винтового движения до проф. Миловича была разработана проф. Громеки.

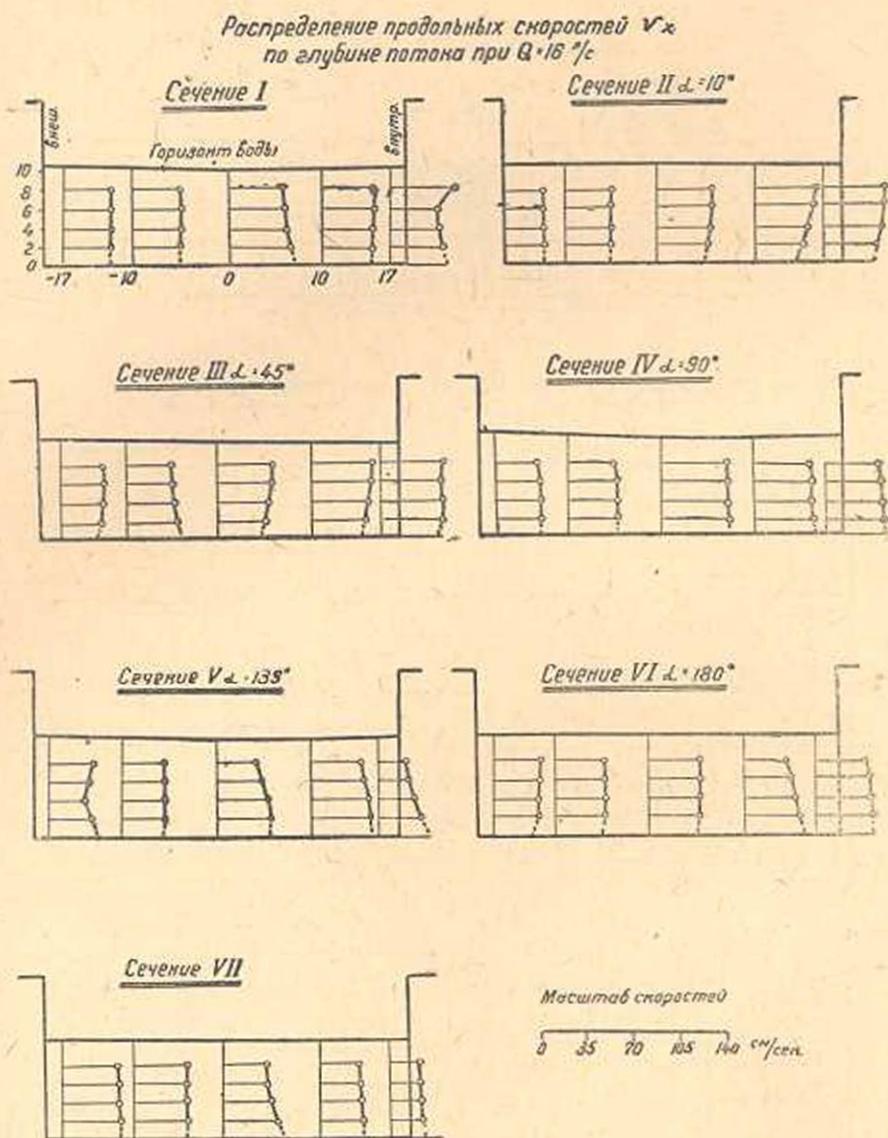


Рис. 56. Распределение продольных скоростей по глубине потока при $Q = 16 \text{ л/сек}$.

$$V_x = v_0 = \text{const} \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad (10)$$

$$v_y = \frac{\Gamma_c}{a} \bar{v}_c \sin \frac{\pi y}{b} \cos \frac{\pi z}{a} \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad (11)$$

$$v_z = - \frac{\Gamma_c}{b} \bar{v}_c \cos \frac{\pi y}{b} \sin \frac{\pi z}{a} \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad (12)$$

т. е. к синусоидальному закону распределения скоростей по глубине потока, что не подтверждается экспериментами ГЭЛ (рис. 7 и 8).

Распределение продольных скоростей
 $V_{\text{пр}}$ по глубине потока при $Q = 9,9 \text{ л/с}$

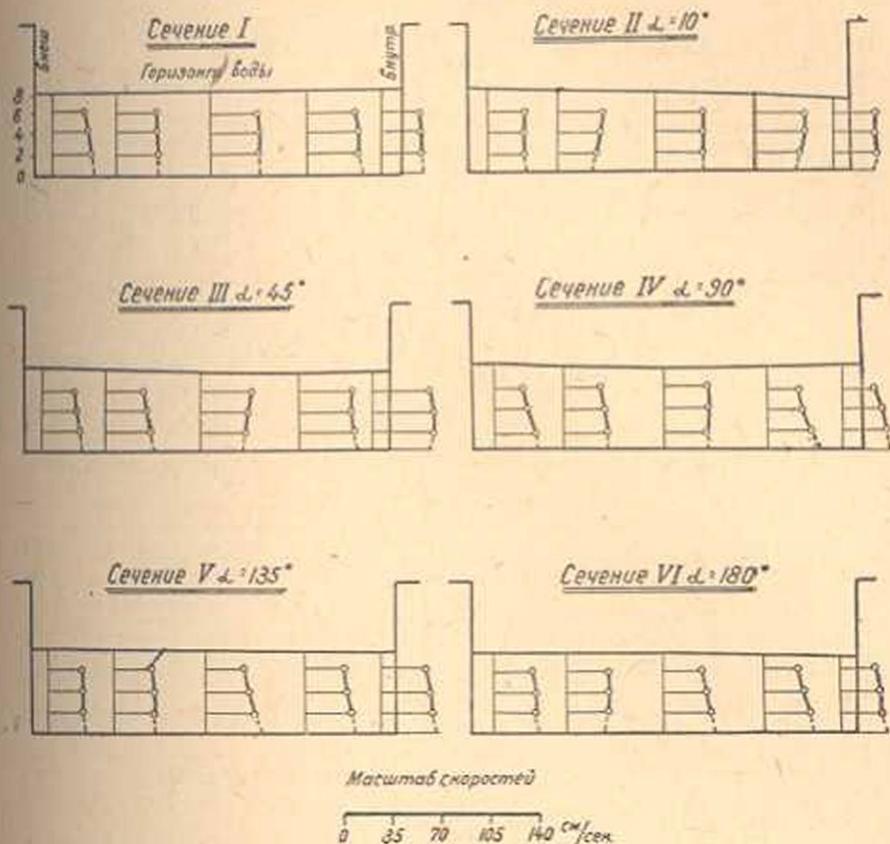


Рис. 5в. Распределение продольных скоростей по глубине потока при $Q = 9,9 \text{ л/сек}$.

Кроме того, система уравнения (10), (11) и (12) не удовлетворяет уравнению Навье-Стокса для вязкой жидкости, что ставит под сомнение теорию продольно-винтового движения в целом. Теория продольно-винтового движения есть только некоторая, искусственно подобранная форма движения, не вытекающая прямо из общих уравнений движения и удовлетворяющая им лишь с известным приближением. Однако, это приближение нельзя считать достаточно приемлемым для практики, так как компоненты скоростей, полученные на основании экспериментов ГЭЛ, совпадают с данными расчета по приведенной теории, причем это несовпадение происходит не только по величине, но иногда и по знаку.

Таким образом, основная гипотеза о постоянстве отношения между компонентами вихрей и скоростей, принятая предыдущими ис-

Распределение продольных скоростей V_x
по глубине потока при $Q = 25,6$ л/с.

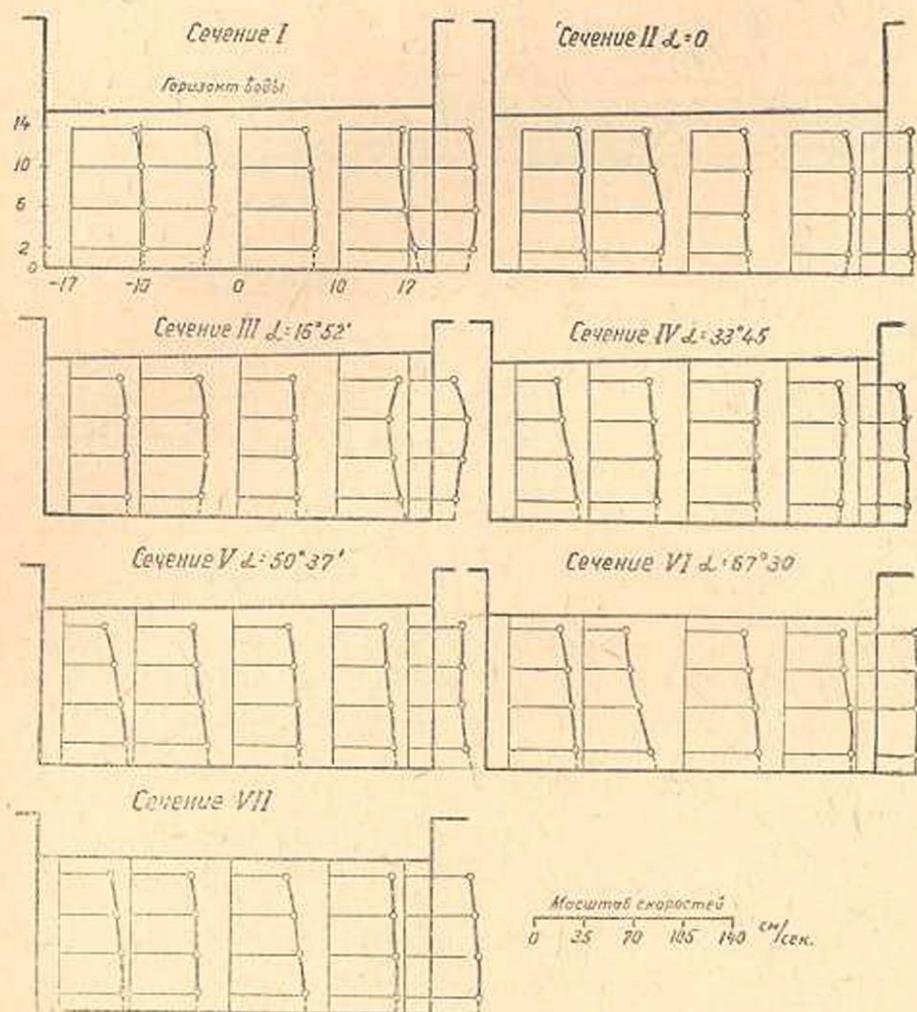


Рис. 6а. Распределение продольных скоростей по глубине потока при $Q = 25,6$ л/с.

следователями, не подтверждается экспериментально для реального потока.

Последнее положение нашло свое отражение и в теоретических исследованиях проф. Бюжгенса и доц. Алексева [6]. Доц. Алексеев доказывает следующую теорему: установившийся вязкий поток несжимаемой жидкости не имеет винтовой структуры с постоянным отношением угловой и продольной скоростей. Вязкий поток может быть винтовым, но только линии токов и вихрей будут составлять

Распределение продольных скоростей V_x
по глубине потока при $Q=16$ л/сек.

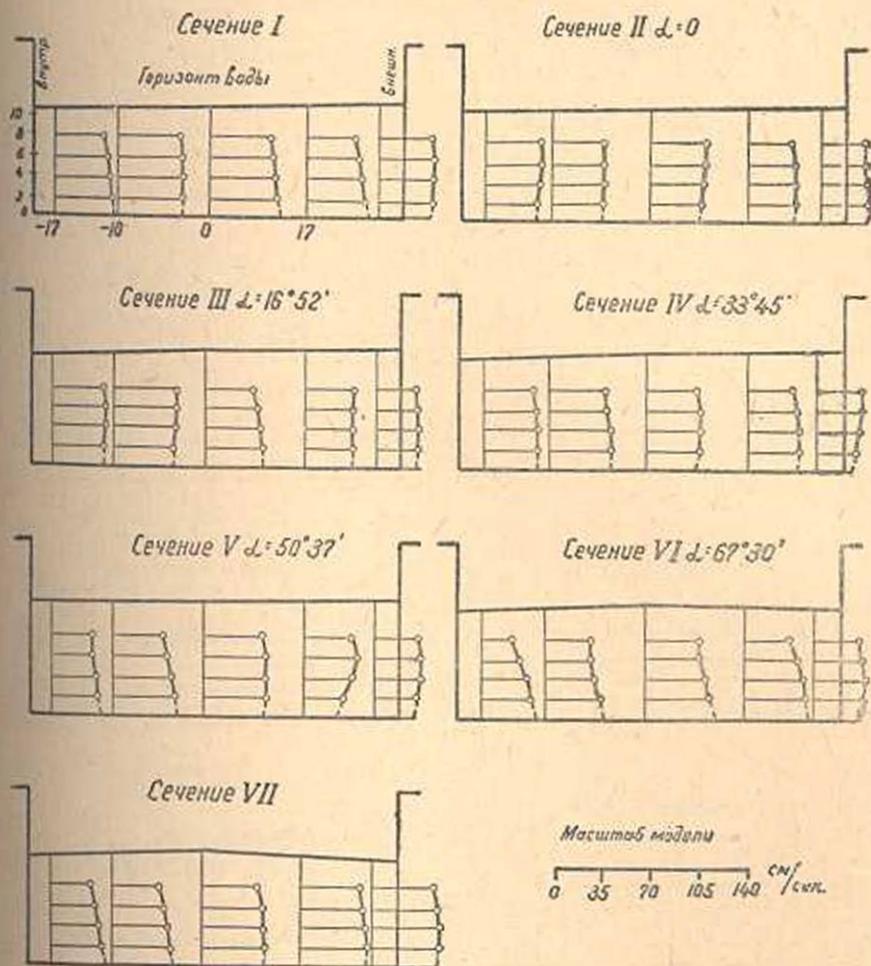


Рис. 66. Распределение продольных скоростей по глубине потока при $Q = 16$ л/сек.

определенный угол между собой и отношение угловой скорости вращения к продольной скорости не может быть постоянной величиной.

Нелишне будет указать, что постоянство коэффициента K в уравнении (1) заранее предрешает параметры циркуляционного движения. Действительно, если заданы значения коэффициента K и элюра продольных скоростей ($v_x = \text{const}$), как это принимает проф. Потанов, то это значит, что в данном случае может существовать только одно циркуляционное движение любой интенсивности.

Из произведенных опытов можно окончательно сделать весьма важный вывод, что наличие в канале циркуляционного потока (например, движение жидкости на поворотах) практически мало изме-

Распределение продольных скоростей V_x
по глубине потока при $Q = 3,9$ л/сек.

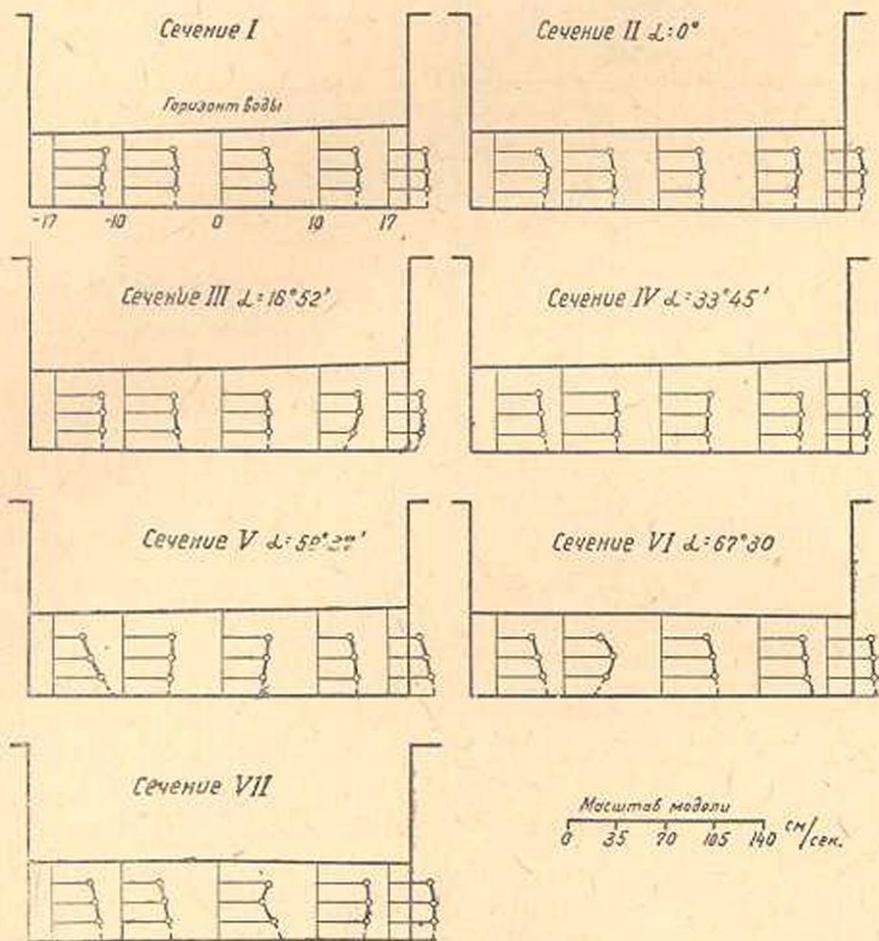


Рис. 6в. Распределение продольных скоростей по глубине потока при $Q = 9,9$ л/сек.

няет характер распределения продольных составляющих скоростей по сечению, что имеет место в прямолинейном канале до и после поворота. Это положение может облегчить анализ циркуляционного движения, так как при этом поток можно рассматривать как плоский.

Рассматривая эпюры вертикальных составляющих скоростей v_z (рис. 7 и 8), видим, что в них не замечается определенной закономерности. Заметной величины вертикальные составляющие скоростей достигают на расстоянии примерно $(3-5)h$ от начала закругления. Вверх по течению они постепенно увеличиваются и достигают своего максимального значения на середине закругления, а затем

Распределение вертикальных составляющих v_z по глубине потока при $Q = 16 \text{ л/с}$.

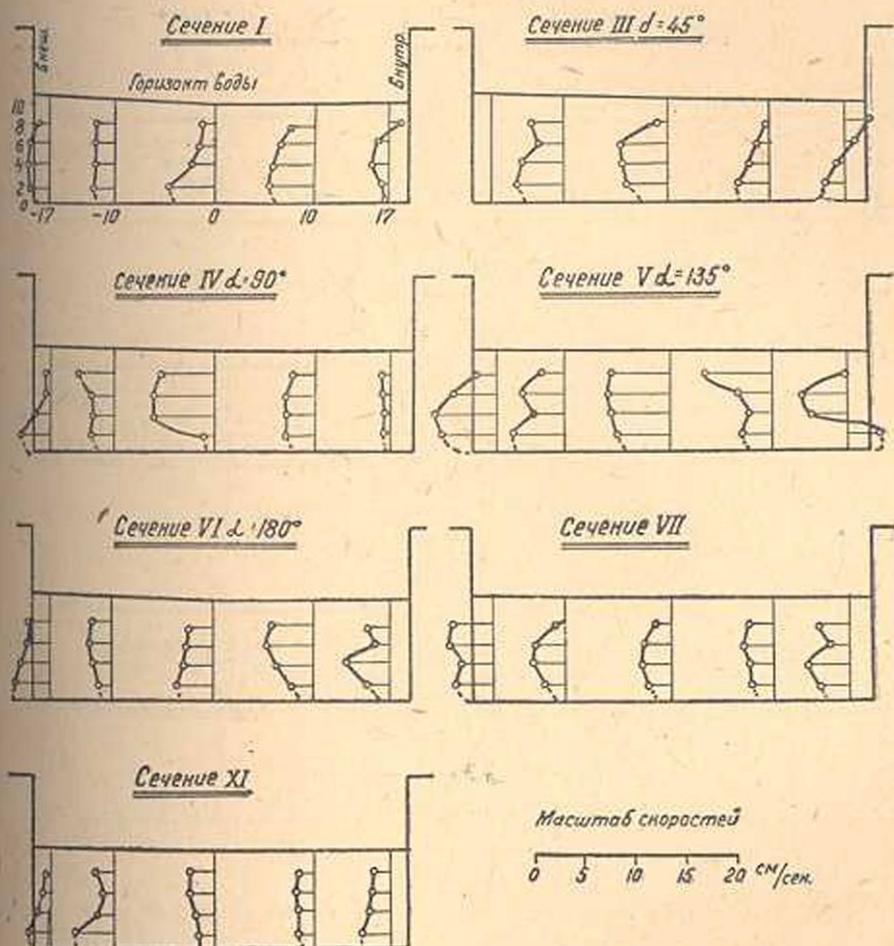


Рис. 7а. Распределение вертикальных составляющих v_z по глубине потока при $Q = 16 \text{ л/с}$.

постепенно уменьшаются и затухают на расстоянии примерно (27-30) h от конца закругления.

Вертикальные составляющие скоростей во всех точках поперечного сечения лотка имеют направление вниз, и величина их примерно составляет от 1/10 до 1/30 значения продольных составляющих скоростей.

Что касается радиальных составляющих скорости v_r , то они возникают и затухают на такой же длине, как и вертикальные составляющие. Радиальные скорости в основном направлены от внешней стенки канала к внутренней и по величине, примерно, составляют 1/8-1/5 продольных составляющих скоростей.

Распределение радиальных составляющих
(v_r) скоростей по глубине потока при
 $Q = 16 \text{ л/с}$.

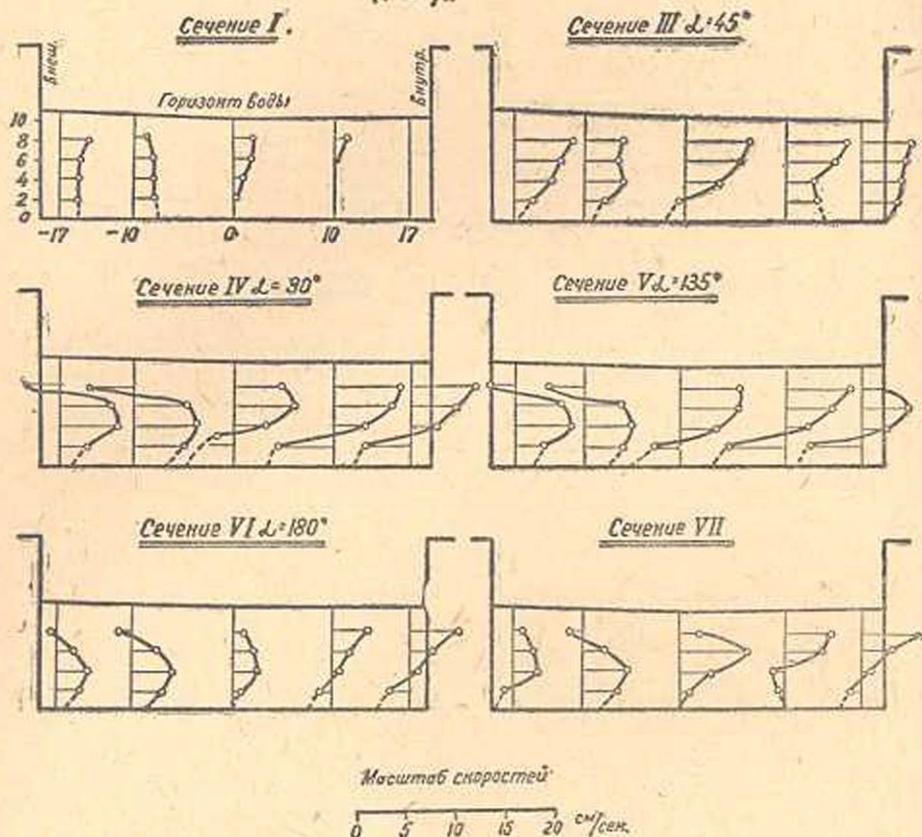
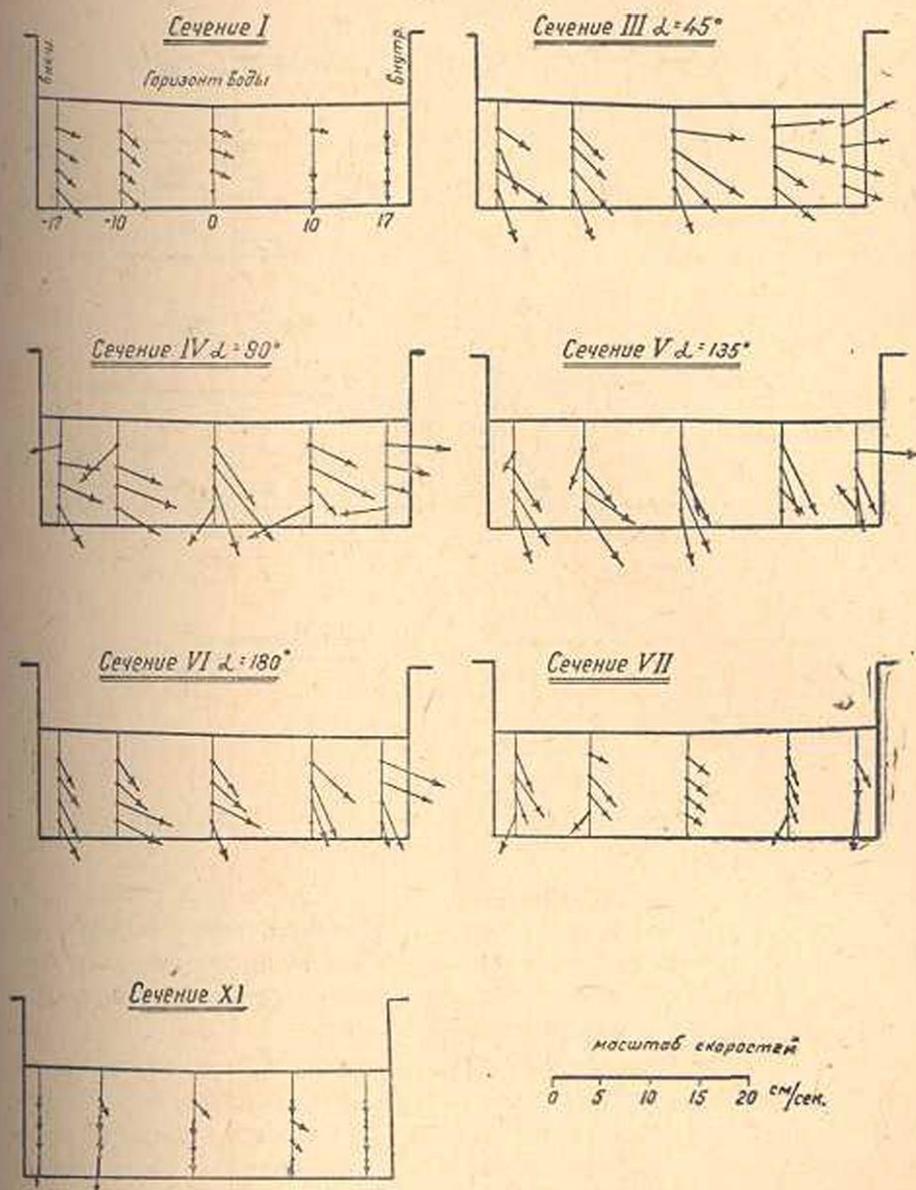


Рис. 76. Распределение радиальных составляющих скоростей v_r по глубине потока при $Q = 16 \text{ л/с}$.

На основании анализа эпюры распределения радиальных скоростей (рис. 7, 8) можно заключить, что в них не обнаруживается общая закономерность.

Были произведены подсчеты компонентов скоростей (v_x , v_y , v_z) по теоретическим формулам Миловича, Буссинеска, Жуковского, Кожевникова. Однако, они не дали желаемых результатов, т. к. получились большие расхождения между теоретически подсчитанными и экспериментальными данными, причем не только по величине, но иногда и по знаку (см. табл. 3).

Причины этих расхождений заключаются в тех умозрительных гипотезах, которые были приняты вышеуказанными исследователями. О теоретической работе Миловича было сказано выше. Что касается других исследователей, то кратко можно отметить, что проф. Жуковский и Буссинеск решали задачу движения жидкости на пово-

Циркуляция в поперечных плоскостях
при $Q = 16 \text{ л/с}$ Рис. 7в. Циркуляция в поперечных плоскостях при $Q = 16 \text{ л/с}$.

роте большой ширины. Это, примерно, соответствует данным экспериментов для малых расходов, когда отношение $\frac{b}{h} = 3,5$. Приближенность теории Жуковского—Буссинеска заключается в том, что согласно ей в потоке на поворотах канала возникают только горизонтальные вихри (т. е. учитывалось влияние только дна лотка) и явления

Распределение вертикальных составляющих V_z по глубине потока $Q=16 \text{ м}^3/\text{сек.}$

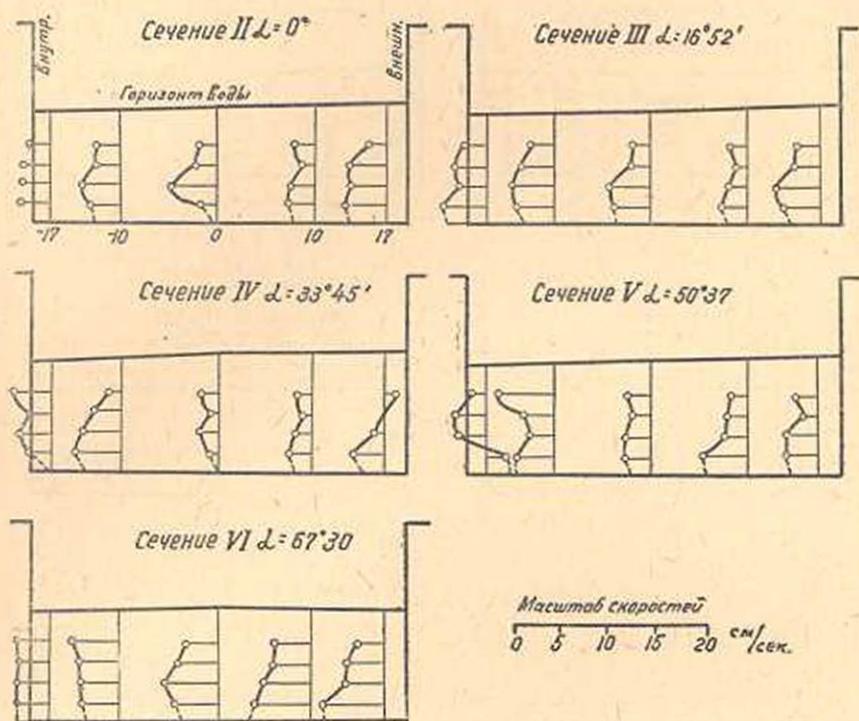


Рис. 8а. Распределение вертикальных составляющих v_z по глубине потока при $Q = 16 \text{ л/с.}$

теоретически анализируются с учетом влияния только этих вихрей. Опыты в ГЭЛ показали, что в потоке одновременно с горизонтальными вихрями возникают и вертикальные. Эти последние особенно заметны на второй половине поворота, о чем свидетельствует вращательное движение поверхностных поплавков.

Рассматривая равнодействующие радиальных и вертикальных составляющих скоростей в поперечных сечениях лотка, можно обнаружить циркуляцию (рис. 9 и 10), которая является следствием неравенства давления (глубины наполнения) жидкости на ее граничных поверхностях. На правом отводящем участке лотка, где глубины воды выравниваются довольно быстро, циркуляция продолжается вниз по течению и плавно затухает на расстоянии, примерно, $(27+30) \text{ h}$, считая от конца поворота.

Эксперименты на модели показали, что чем меньше радиус поворота и больше скорости, тем интенсивнее происходит циркуляция (рис. 7 и 8).

На основании экспериментов ГЭЛ можно сделать следующие выводы:

Таблица 3

Подсчет компонентов v_x, v_y, v_z по формулам

Координаты точек в см			М и л о в и ч а			Б у с с и н е с к а		Ж у к о в с к о г о	К о ж е в н и к о в а			О п ы т н ы е д а н н ы е Г Э Л		
x	y	z	v_x см/сек.	v_y см/сек.	v_z см/сек.	v_y	v_z	v_y	v_x	v_y	v_z	v_x	v_y	v_z
1027	10	14	45.6	36.8	7.46	-17.5	2.37	19.0	47.3	1.32	1.04	40.2	2.01	3.66
1075	0	2	40.2	-27.5	10.0	-21.1	-2.25	-288.5	36.4	1.71	-2.45	44.5	-4.5	-5.45
1075	17.0	10	56.45	23.2	43.6	5.34	0.435	7.2	50.8	5.38	0.35	43.0	6.65	7.76
980	-10	6	33.35	6.70	17.4	2.53	-0.287	-48.4	36.8	0.66	-0.080	40.6	0	-5.32
1027	17.0	2	45.6	60.1	42.4	-46.0	-6.48	-41.70	37.8	4.03	8.5	56.2	2.81	-1.18
1027	-17.0	10	25.1	3.16	11.5	1.21	0.85	1.65	39.6	0.47	-0.0093	28.0	-1.4	-1.98
1075	10	14	48.3	35.6	8.6	-21.9	3.09	25.15	47.2	5.63	0.057	46.4	6.55	-2.95
1075	0	6	40.2	-9.27	2.21	3.01	-0.455	74.6	40.8	0.77	0.067	47.0	10.18	-6.93

Распределение радиальных составляющих v_r
по глубине потока при $Q = 16 \text{ л/сек}$.

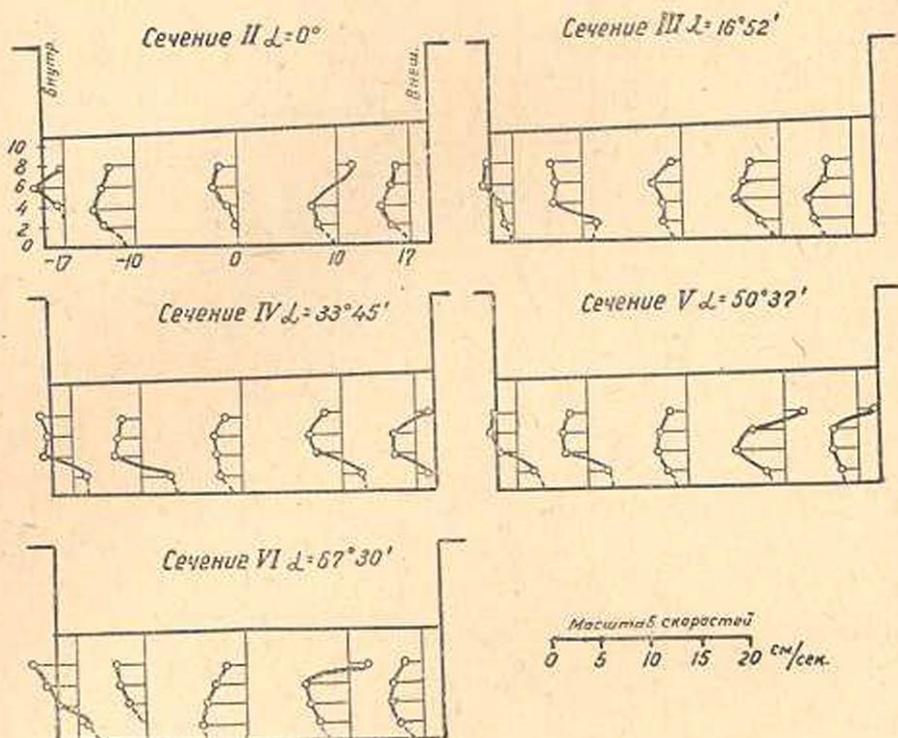


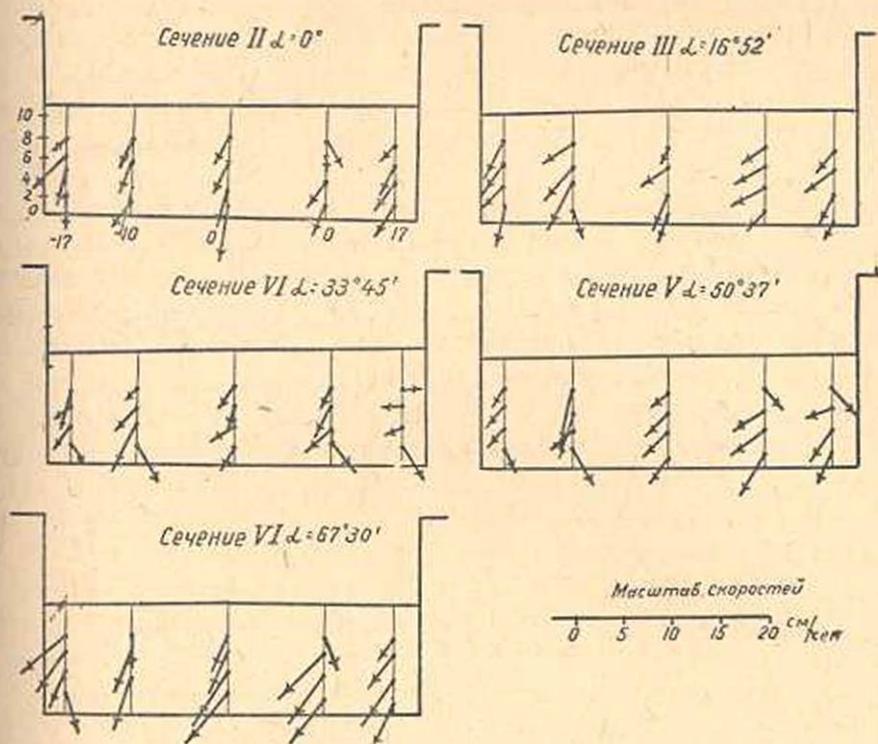
Рис. 86. Распределение радиальных составляющих по глубине потока при $Q = 16 \text{ л/сек}$.

Выводы

1. Изменение продольных составляющих скоростей (v_x) по ширине лотка подчиняется гиперболическому закону (закон площадей), причем не только для поверхностных и донных частиц, но и для любой частицы, находящейся в радиальном сечении поворота, за исключением начального и конечного сечения, а также пограничных слоев боковых стенок водовода, где скорость должна быть равна 0. Необходимость введения поправок Шукри и Кожевникова в выражении $v \cdot r = \text{const}$ не подтверждается опытами в ГЭЛ.

2. Характер эпюры распределения продольных составляющих скоростей (v_x) по глубине потока незначительно меняется на протяжении всей модели (за исключением небольшой зоны у дна), т. е. как на прямых, так и на кривом ее участках.

Наличие в канале циркуляционного движения практически мало

Циркуляция в поперечных плоскостях
при $Q = 16 \text{ л/сек}$ Рис. 8в. Циркуляция в поперечных плоскостях при $Q = 16 \text{ л/сек}$.

изменяет характер распределения продольных скоростей по длине потока.

3. На основании произведенных экспериментов доказывается, что основная гипотеза теории однородно-винтового движения и продольно-винтового движения — «о постоянстве отношения между вращательными и линейными скоростями» не соответствует действительности. Вязкий поток может быть винтовым, но только линии тока и вихри будут составлять определенный угол между собой. Соблюдение закона площадей на радиальных плоскостях не дает основания считать поток потенциальным по всему сечению и применять без существенных корректив теорию потенциального движения.

4. Рассматривая эпюры вертикальных составляющих скоростей v_z , видим, что в их изменениях на протяжении закругления не замечается определенной закономерности. Заметной величины скорости v_z достигают на расстоянии примерно $(3-5)h$ от начала закругления, считая вверх по течению. Затем они постепенно увеличиваются и достигают максимальных значений на закруглении и, постепенно затухая, исчезают на расстоянии примерно $(27-30)h$, считая

от конца закругления. Вертикальные компоненты скоростей составляют примерно от 1/10 до 1/30 продольных составляющих скоростей (v_x) и направлены вниз.

5. Радиальные компоненты скоростей возникают и затухают на такой же длине канала, как и вертикальные составляющие. Они в основном имеют направление от внешней стенки канала к внутренней и равны примерно 1/8—1/15 продольных составляющих скоростей.

6. Компоненты скорости (v_x , v_y , v_z), измеренные и теоретически подсчитанные по формулам Миловича, Жуковского—Буссинеска и Кожевникова, не дали удовлетворительного совпадения с опытными данными ГЭЛ не только по величине, но иногда и по знаку. Причина этого расхождения заключается в принятии некоторыми авторами теории потенциального потока (Милович) или постоянства отношения углов и линейных скоростей (Милович, Потапов), или отсутствия в потоке системы вертикальных вихрей (Жуковский—Буссинеск).

Гидроэлектрическая Лаборатория
Водно-Энергетического Института
Академии Наук Армянской ССР

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. А. Я. Милович—Нерабочий изгиб потока. Новочеркасск, 1914.
2. М. В. Потапов—Поперечная циркуляция в открытом потоке и ее гидротехническое применение. Москва, 1936.
3. М. П. Кожевников—О движении воды на повороте русла. Гидротехническое стр-во, № 9, 1949.
4. А. Shukry—„Flow around bends in an open flume“. A. S. C. E. June, 1949.
5. А. Я. Милович—Основы динамики жидкости. Москва, 1936.
6. Научные записки Московского Гидрометеорологического Института им. Вильямса, т. VII, 1944.

Մ. Ի. Տեր-Ասվաճատրյան

ՄԱԿԵՐԵՍՆԵՐԻ ՊԱՀՊԱՆՄԱՆ ՕՐԵՆՔԸ ԲԱՑ ՋՐԱՏԱՐԵՐԻ ԿՈՐ ՀԱՏՎԱԾՈՒՄ ՀԵՂՈՒԿԻ ՇԱՐՔՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հայկական ՍՍՐ Գիտությունների Ազգային Հրահանգի Ինստիտուտի, Հիդրո-էլեկտրական Լաբորատորիայում կատարված փորձերի հիման վրա հզղվածում արվում է մակերեսների սլահպանման օրենքը ջրատարի կոր հատվածում՝ հեղուկի շարժման ժամանակ:

Կատարված փորձերից կարելի է անել նեաեյալ եզրակացությունները:

1. Արագությունների ընդերկայնական բազաղրիչների փափսխումը (v_x) ջրատարի յայնություններ ենթարկվում է հիպերբոլական օրենքին (մակեր-

բաների պահպանման օրենքը) ոչ միայն մակերեսային և հատակային մասնիկների համար, այլ և ցանկացած մասնիկի համար, որը գտնվում է կորացման շառավղային կտրվածքում (բացառութեամբ սկզբնական և վերջնական կտրվածքներին):

2. Արագությունների ընդերկայնական բաղադրիչների փոփոխումն ըստ խորութեան՝ մոդելի ամբողջ երկարութեամբ փոփոխվում է աննշան կերպով (բացառութեամբ հասակի մի բարակ շերտի) ինչպես կոր, այնպես էլ ուղիղ հատվածներում:

3. Փորձերի հիման վրա ասպացուցվում է, որ միատարր պտուտակային շարժման և ընդերկայնական պտուտակային շարժման թեթրիաների հիմնական հիպոթեզները՝ պատող ու դժային արագությունների հարաբերության անփոփոխ լինելու մասին—իրականութեամբ չեն համապատասխանում:

4. Արագությունների ուղղաձիգ բաղադրիչներին փոփոխումը կորացման հատվածում կատարվում է ոչ օրինաչափ կերպով: v_z զրգալի մեծութեան է հասնում (3—5) և հեռավորութեան վրա, հաշված կորացման սկզբից և, աստիճանաբար մարվելով, անհետանում է (27—30) հում՝ հաշված կորացման վերջից:

5. Արագությունների շառավղային բաղադրիչներն առաջ են դալիս և մարվում են նույնպես երկարութեան վրա, ինչ որ ուղղադժային բաղադրիչները: Նրանք հիմնականում ուղղված են արտաքին պատից դեպի ներքի պատը:

Հետագա հետազոտման նպատակն է լինելու ուսումնասիրել 213 կորացում ունեցող մոդելներում հոսանքի կլինեմատիկան: