

TALLINNA POLÜTEHNILISE  
INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

СЕРИЯ А

№ 233

СБОРНИК СТАТЕЙ

ПО

**САНИТАРНОЙ ТЕХНИКЕ**

**III**



Er. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО  
ИНСТИТУТА

С Е Р И Я А

№ 233

1966

---

СБОРНИК СТАТЕЙ  
ПО  
САНИТАРНОЙ ТЕХНИКЕ  
Ш

Таллин  
1966

## С о д е р ж а н и е

	Стр.
1. Х.А. Мельдер. Некоторые вопросы биологической очистки сточных вод сульфатно-целлюлозного производства.....	3
2. Х.Я. Лонд, Л.А. Тепакс. Предварительные результаты исследования микрофльтрации на Таллинской водоочистой станции.....	13
3. Г.С. Иерет. Гидравлические расчеты воздуховодов, перемещающих насыщенный влагой воздух.....	23
4. Л.А. Тепакс. Критика формулы Шези.....	31
5. Р. Казалупскене, Б. Багинскас. Некоторые данные по исследованию и проектированию экспериментального завода г.Шауляй Лит.ССР по промышленному изготовлению гуматов.....	45
6. Ю.Э. Кальвяэ. О технико-экономическом обосновании при планировании комплексного использования водных ресурсов малого экономического района.....	51
7. Х.Я. Лонд, Л.А. Тепакс. Оптимальные режимы процесса микрофльтрации и влияние микрофильтров на технологию очистки питьевых вод.....	61
8. Л.Л. Пааль, А.М. Айтсам, В.К. Асток. О методике определения расчетных скоростей и продолжительности течений, определяющих распространение веществ загрязнения в морских заливах.....	71
9. В.К. Асток. О характере распределения течений по вертикали в поверхностном слое моря.....	85
10. А.М. Айтсам, Л.Л. Пааль, Х.А. Тибар. К вопросу вертикального смещения сточных вод в непроточных водоемах.....	99

Er.7220

Eesti NSV  
Teaduslik  
Raamatukogu  
Teaduste Akadeemia

УДК 628.35: 676.0

Х.А. Мельдер

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ  
СТОЧНЫХ ВОД СУЛЬФАТНО-ЦЕЛЛЮЛОЗНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА

В ближайшие годы намечается бурное развитие целлюлозно-бумажной промышленности Советского Союза. Сравнительно высокими темпами будет развиваться производство таких прогрессивных видов полуфабрикатов, как сульфатная и вискозная целлюлоза, полуцеллюлоза и химическая древесная масса. Например, в 1965 году планом предусмотрено увеличение выработки сульфатной целлюлозы на 50% по сравнению с предыдущим годом. Соответственно будет расти и количество сточных вод, сбрасываемое комбинатами в водоемы. Сточные воды целлюлозного производства, и в частности сульфатно-целлюлозных комбинатов, содержат много органических веществ, а также ядовитых соединений серы, что вызывает сильное загрязнение водоемов. Очевидно, что в таких условиях решение вопросов очистки сточных вод имеет первостепенное значение.

Кафедра санитарной техники и гидравлики ТПИ занимается изучением состава и количества сточных вод сульфатно-целлюлозного производства, а также некоторыми вопросами их биологической очистки. Базой для исследований служит Кехраский целлюлозно-бумажный комбинат, производящий небеленую сульфатную целлюлозу, из которой затем вырабатывается упаковочная и мешочная бумага.

Согласно литературным данным расход сточных вод на единицу продукции при производстве небеленой целлюлозы сульфатным способом может колебаться в очень широких пределах в зависимости от применяемой технологии и от процента использования оборотных вод. Диапазон колебаний расходов по данным различных авторов составляет от 35 до 400 м<sup>3</sup> на тонну целлюлозы. По данным ВНИИБа для вновь строящихся предприятий в Советском Союзе этот предел устанавливается в размере 160-165 м<sup>3</sup>/т [1].

Так как при всяком целлюлозном заводе обычно располагается и бумажная фабрика, сточные воды которой также подлежат очистке перед спуском, то безусловно представляет интерес и расход сточных вод от бумажной фабрики. Данные различных авторов здесь также резко расходящиеся и в среднем составляют 10-150 м<sup>3</sup> воды на тонну бумаги. Однако учитывая, что из небеленой сульфатной целлюлозы вырабатывают низкосортную (упаковочная и мешочная) бумагу, этот предел может быть сужен от 10 до 40 м<sup>3</sup>/т.

Для получения достоверных данных по расходу сточных вод Кехраского ЦБК, автором был составлен в 1964 г. баланс стоков комбината (см. таблицу I) и получены удельные расходы воды на единицу продукции. По целлюлозному заводу расход воды 190 м<sup>3</sup>/т, а по бумажной фабрике - 136 м<sup>3</sup>/т.

В отношении загрязнений стоки целлюлозного производства превосходят стоки бумажного производства во много раз. При производстве небеленой сульфатной целлюлозы загрязнение сточных вод главным образом обуславливается наличием в них отработанного щелока и промоек волокна. В дурнопахнущих сточных водах, кроме того, присутствуют ядовитые сернистые соединения.

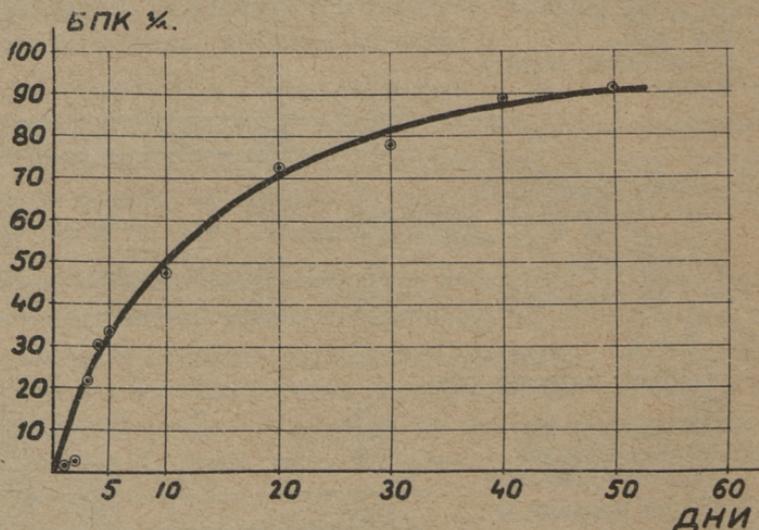
Концентрация волокно-щелокосодержащих сточных вод зависит от их удельного расхода и от процента регенерации щелоков.

Т а б л и ц а I  
Баланс сточных вод

Наименование цехов и источников стоков	Среднечасовой расход (м <sup>3</sup> /час)				
	Чистых и ус- ловно чистых	Волок- но-и щелоко- содер- жащих	Дур- но-пах- ну- щих	Шламо- со-дер- жащих	Общий рас- ход
<b>I. Целлюлозный завод</b>					
1. Варочно-промывной цех					
-скипидарная сдувка	-	-	3	-	3
-перелив из бака аккумулятора	-	-	100	-	100
-прочее	7	7	-	-	14
2. Сортировочный цех					
-вода от вакуум-фильтров	-	600	-	-	600
3. Выпарной цех					
- грязный конденсат	-	-	30	-	30
- барометрический кон-денсат	-	-	250	-	250
- прочее	2	-	-	-	2
4. Содорегенерационный цех					
- охлаждающая вода	53	-	-	-	53
5. Каустизационный цех					
- шламовые воды	-	-	-	50	50
6. Отдел баков					
- охлаждающая вода и прочее	8	-	-	-	8
<b>ИТОГО по разделу I</b>	<b>70</b>	<b>607</b>	<b>383</b>	<b>50</b>	<b>1110</b>
<b>II. Бумажная фабрика</b>					
- воды от бумажных машин	151	300	-	-	451
- перелив от бака оборотной воды	-	360	-	-	360
<b>ИТОГО по разделу II</b>	<b>151</b>	<b>660</b>			<b>811</b>
<b>III. ТЭЦ</b>					
- продувка паровых котлов	18	-	-	-	18
- охлад. вода турбин	362	-	-	-	362
- хим. водоочистка	30	-	-	-	30
- гидрозолеудаление	-	-	-	180	180
<b>ИТОГО по разделу III</b>	<b>410</b>			<b>180</b>	<b>590</b>
<b>Суммарный расход по комбинату:</b>	<b>631</b>	<b>1267</b>	<b>383</b>	<b>230</b>	<b>2511</b>

Последний должен быть в современных комбинатах при хорошо налаженной технологии не менее 95%, однако фактически нередко составляет лишь 75–85%. В Кехраском ЦБК регенерация сульфатного щелока достигает 92–94%. Остальная часть теряется в процессе производства, смывается в канализацию и попадает вместе со сточными водами в водоем.

Отработанный сульфатный щелок содержит много органического вещества (процент органики в сухом остатке – 65%), из которого более 50% является трудноокисляемым. БПК<sub>5</sub> щелока в среднем равен 260–280 кг/т абсолютно сухой целлюлозы [2]. Проведенные нами исследования показали, что пятисуточное биохимическое потребление кислорода сульфатного щелока, идущего на выпарку, составляет 33–45 г/л, а его ХПК от 232 и 328 г/л, что значительно больше БПК<sub>5</sub>. Присутствие в щелоке трудноокисляемых веществ замедляет скорость БПК и нитрификацию. БПК<sub>полн</sub> наступает лишь на 50–60 суток.



Фиг. 1. БПК отработанного щелока Кехраского ЦБК

БПК щелока Кехраского ЦБК изображено на фиг. 1.

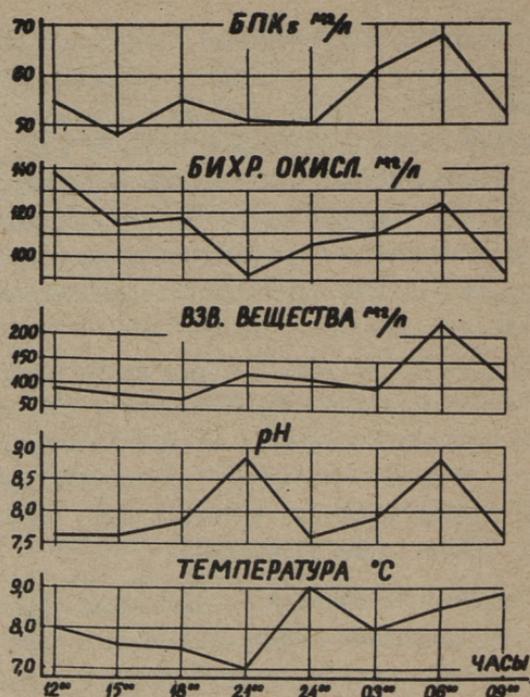
В сточных водах щелок находится в разбавленном виде. При этом снижается разность БПК<sub>5</sub> и ХПК в зависимости от степени разбавления. Была сделана попытка установить корреляцию между БПК<sub>5</sub> и ХПК волокнодержащих сточных вод сульфатно-целлюлозного производства. В 40 пробах определяли БПК<sub>5</sub> и ХПК. В результате получена слабо выраженная зависимость с коэффициентом корреляции  $K = 0,55$ . Можно предполагать, что между БПК<sub>полн</sub> и ХПК существует более определенная зависимость.

Кроме органических веществ в общем стоке сульфатно-целлюлозного комбината присутствуют ядовитые соединения серы (меркаптаны), которые попадают в сток из варочного и выпарного цехов. Р.М. Павлинова [2] приходит к выводу, что больше вреда водоему приносят растворенные органические вещества, чем токсические соединения.

Необходимая степень очистки промышленных сточных вод лимитируется требованиями санитарных норм к качеству воды водоема после сброса стоков предприятием. В некоторых случаях (реки с малым расходом, или водоемы рыбохозяйственного значения) требуется очистка всех вод предприятия. В противном же случае можно обойтись лишь очисткой выделенной из общего стока наиболее загрязненной части сточных вод.

В условиях Кехраского ЦБК требуется полная очистка общего стока комбината.

Для проектирования очистных сооружений необходимо знать также неравномерность расходов и изменение концентраций сточных вод. Литературные данные, которых, кстати, очень мало, указывают на значительное колебание степени загрязненности стоков в результате залповых сбросов щелока в канализацию. В частности З. Наначкова и О. Богатырев [3] приводят графики суточного колебания окисляемости и БПК<sub>5</sub> общего стока, из которых видно, что пиковые величины этих показателей превышают среднесуточные в 7-8 раз.



Фиг. 2. Изменение показателей загрязненности общего стока Кемраского ЦБК

На фигуре 2 приведены данные об изменении некоторых показателей загрязненности сточных вод в общем сбросном канале Кемраского ЦБК в течение суток. При нормальной работе комбината коэффициенты неравномерности  $K_{\text{час}} < 2,0$ . Из-за большого удельного расхода сточные воды являются слабоконцентрированными. Этот недостаток характерен и для некоторых других целлюлозных комбинатов как у нас, так и за рубежом.

Относительно неравномерности расходов сточных вод в литературе имеется также мало сведений. В основном указывается на постоянство расходов ( $K_{\text{час}} = 1,1 - 1,2$ ). Для замера расхода воды на Кемраском комбинате будет установлен самопишущий расходомер.

Самым эффективным способом полной очистки сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности считается их биологическая очистка в аэротенках. При этом волокносодержащие воды предварительно освобождаются от основной массы волокна и дурнопахнущие воды дезодорируются (например, озонированием). Шламосодержащие воды обычно в общий сток не попадают.

Для изучения процесса очистки и определения расчетных параметров аэротенков в 1964 году была построена опытная полупроизводственная установка на Кехраском ЦБК, состоящая из низконапорных аэротенков. Схема и описание опытной установки были опубликованы ранее [4].

Осенью 1964 года был осуществлен пуск установки и в течение двух месяцев происходило наращивание активного ила. Затем были проведены два цикла работы с различной величиной расхода сточных вод. Результаты этих исследований приводятся ниже.

В период наращивания активного ила, а также во время опытных циклов установка работала на натуральных волокнощелочесодержащих стоках целлюлозного завода комбината. Предварительно стоки проходили сетчатый фильтр типа "Вако" для уменьшения промоев волокна и затем к воде добавлялись питательные соли (азот и фосфор) в соотношениях БПК<sub>5</sub>:N:P=100:5:1. Основные результаты работы опытной установки изложены в таблице 2.

Аэротенк работал без регенерации активного ила по схеме аэротенка-смесителя. Время отстаивания во вторичном отстойнике было в I цикле - 1,8 часа, а во II цикле - 1,5 часа. Сброса избыточного активного ила не производили. Необходимо отметить, что сравнительно низкая доза ила в системе является результатом высокого индекса и выноса ила вместе с очищенной водой. Высокий индекс очевидно вызван дроблением хлопьев ила в насосе возвратного ила и частично скоплением ила на дне отстойника. Последний недостаток был ликвидирован установкой скребка на дно отстойника.

Т а б л и ц а 2

Показатели процесса биохимической очистки  
волокно-шелокосодержащих вод

Показатели	Един. изм.	№ цикла опыта	
		I	II
Продолжительность цикла	сутки	14	13
Продолжительность аэрации	часа	3,1	2,5
Расход поступающей воды	м <sup>3</sup> /час	1,44	1,80
Интенсивность аэрации	м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> час	75	78
Содержание взвешенных веществ:			
а) в поступ. воде	мг/л	74	112
б) в очищ. воде	мг/л	42	37
в) эффект очистки	%	43	67
Температура сточной воды			
а) поступающей	°С	12	9
б) очищенной	"	13	12
рН			
а) поступающей воды		7,8	7,6
б) очищенной воды		7,6	7,4
БПК <sub>5</sub>			
а) поступающей воды	мг/л	44	39
б) очищенной воды	мг/л	6	5
в) эффект очистки	%	86	87
ХПК			
а) поступающей воды	мг/л	115	113
б) очищенной воды	мг/л	77	76
в) эффект очистки	%	33	33
Окислительная мощность по БПК <sub>5</sub>	г/м <sup>3</sup> сутки	295	329
Нагрузка на 1 г беззольного вещества акт. ила по БПК <sub>5</sub>	мг/г сутки	312	336
Доза активного ила в аэротенке	г/л	1,07	1,09
Зольность акт. ила	%	12	10

П р и м е ч а н и е: В таблице указаны средние значения за цикл.

В процессе работы постоянно производилось микрофотографирование активного ила. Хлопки ила были в основном мелкие. Из простейших микроорганизмов в иле постоянно присутствовали прикрепленные формы реснитчатых (Ciliata), что свидетельствует о благоприятном кислородном режиме в аэротенке. В процессе аэрации происходит интенсивное разложение целлюлозного волокна и в очищенной воде оно почти полностью отсутствовало.

Воздух в аэротенк подавался в избыточном количестве от нужного для окисления органического вещества, исходя из условий хорошей циркуляции в аэротенке. Это обстоятельство является лимитирующим при очистке слабоконцентрированных вод в низконапорных аэротенках.

Процесс биологической очистки и качество очищенной воды за описываемый период работы опытной установки можно считать удовлетворительным, принимая во внимание короткое время пребывания жидкости в аэротенке и отсутствие регенерации.

С экономической точки зрения очистка малоконцентрированных вод с БПК<sub>5</sub> < 100 мг/л в аэротенках нецелесообразна, так как при низкой дозе ила (а доза ила, как известно, зависит от нагрузки) возможно достигнуть лишь невысокой окислительной мощности сооружения. Из изложенного можно сделать вывод, что для эффективной и экономичной очистки вод в аэротенках необходимо предварительно технологическими мероприятиями снизить удельный расход воды на единицу продукции и тем самым одновременно повысить их концентрацию.

В настоящее время опытная установка работает на сточных водах с концентрацией по БПК<sub>5</sub> = 100 мг/л и более. Повышение концентрации достигается добавлением к сточной воде отработанного шлока. При этом моделируется сток будущего усовершенствованного и реконструированного комбината. О результатах будет сообщено дополнительно.

В заключение хочется кратко остановиться на вопросах пенообразования в аэротенках. Аэрация сточных вод сульфатно-

целлюлозного производства сопровождается обильным пенообразованием, что крайне затрудняет процесс очистки. Интересно отметить, что в наших опытах с малоконцентрированными сточными водами пена практически отсутствовала. Однако с повышением концентрации (добавление щелока) появляется пена, вызванная наличием в щелоке поверхностно-активных веществ. Опытный аэротенк был снабжен центробежной насадкой для гидравлического пеногашения струей очищаемой сточной воды. Насадка рассчитывалась по методике ВОДГЕО [5]. Предварительные данные наших исследований указывают на возможность механического подавления пены струей воды. При этом рекомендуется 80-100% поступающей воды подавать через брызгала. Этим жидкость будет подвергаться дополнительной аэрации, что, в свою очередь, позволит снизить интенсивность основной аэрации и тем самым уменьшит пенообразование.

#### Л и т е р а т у р а

1. Л.А. Мазинг и др. Методы очистки сточных вод. "Бумажная промышленность", 1962, № 9.
2. Р.М. Павлинова. Влияние сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности на рыбопромысловые водоемы и разработка норм их сброса. Известия ВНИИОРХ, том 31, вып. I, 1952.
3. Z.Nanačkova-Zekeova, O.Bogatyrev. Vlastnosti odpadovej vody z vyrobny sulfatovej celulozy "Vodni hospodarstvi", 1959, nr.7.
4. X.A. Мёльдер, Л.А. Тепакс. Предварительные данные о возможностях биологической очистки сточных вод Кехраского целлюлозно-бумажного комбината. Труды ТПИ, серия А, № 223. "Сборник по санитарной технике II". Таллин, 1965г.
5. И.Л. Монгайт и др. Исследование методов механического разрушения пены в аэротенках. ВОДГЕО, Научные сообщения. Сентябрь, 1963.

УДК 628.163.001.5

Х.Я. Лонд, Л.А. Тепакс

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
МИКРОФИЛЬТРАЦИИ НА ТАЛЛИНСКОЙ ВОДООЧИСТНОЙ  
СТАНЦИИ

Проблема снабжения населения и промышленности высококачественной водой приобретает в настоящее время в связи с ростом городов и быстрым развитием промышленности исключительно большое значение. Перед научными работниками встают большие задачи по улучшению очистки воды и интенсификации процессов очистки природных вод, которые дадут возможность в значительной степени увеличить производительность существующих и вновь создаваемых водоочистных станций.

Как известно, в большинстве озер и водохранилищ, служащих источниками водоснабжения, в периоды "цветения" (весной, летом и осенью) сильно изменяются физико-химические и гидробиологические свойства воды. Создаются благоприятные условия для развития микрофлоры воды, развивается большое количество фитопланктона с преобладанием диатомовых, зеленых и сине-зеленых водорослей.

Как показала практика, в эти периоды резко ухудшаются условия очистки воды на водоочистных станциях и особенно условия работы песчаных фильтров. В связи с этим растет расход промывной воды и снижается производительность водоочистной станции.

Одним из эффективных методов удаления фитопланктона и частично взвешенных веществ из воды, поступающей на водоочистные сооружения, является фильтрация воды через сетку с микроскопическими отверстиями [1-4]. Этот процесс получил название микрофильтрации, а сам механизм назван микрофильтром.

В первую очередь процесс микрофильтрации нашел применение как предварительная обработка воды для обеспечения нормальной работы последующих водоочистных сооружений. Для технических водопроводов микрофильтрация применяется также как самостоятельный процесс, заменяющий обработку воды на скорых песчаных фильтрах [1, 3, 5].

Как показала практика эксплуатации микрофильтров, а также данные литературных источников [6, 7, 8], с помощью микрофильтрации на водоочистных станциях достигается:

1. Уменьшение общего расхода промывной воды.
2. Снижение потерь напора на фильтрах.
3. Значительное увеличение продолжительности фильтрационного цикла песчаных фильтров.
4. Сокращение расхода химикатов на обработку воды.

Указанный эффект дает полное представление о важности процесса микрофильтрации в технологии обработки воды, содержащей планктон, и доказывает необходимость проведения исследований в этой области. Несмотря на многообразие применения микрофильтрации для очистки питьевых вод, закономерность самого процесса микрофильтрации и расчет микрофильтров изучены еще недостаточно.

В Советском Союзе изучением этих вопросов занимается в основном Академия коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова. Полученные положительные результаты подтвердили возможность использования гравитационных микрофильтров на наших водопроводах [6, 7, 9]. По инструкции Академии коммунального хозяйства институтом "Гипрокоммунводоканал" была запроектиро-

вана установка микрофильтров, которая была пущена в ход на водоочистной станции гор. Ижевска. Установка работала без перерыва с мая до октября 1964 года [7].

Как известно, озеро Клемисте, которое является водостоком гор. Таллина, очень богато водорослями в период "цветения". Суммарная численность клеток фитопланктона в мл достигает иногда ста тысяч и больше. Среднее количество взвешенных веществ, в основном органического происхождения, колеблется от 10 до 30 мг/л. Прозрачность озерной воды снижается до 20 см по кресту. Такое большое количество фитопланктона нарушает нормальную работу водоочистных сооружений.

В целях улучшения положения на Таллинской водоочистной станции был построен опытно-производственный микрофильтр МФ-2 с производительностью до 100 м<sup>3</sup>/час. Вращающийся барабан диаметром в 1 м и длиной в 1 м имеет 8 фильтрующих элементов. Суммарная площадь фильтрующих элементов равна 1,85 м<sup>2</sup>, т.е. составляет 59% от общей площади барабана, покрытого микросеткой 004. Промывное устройство щелевого типа, позволяющее изменять ширину щели в пределах от 0,1 до 0,5 мм. Барабан микрофильтра вращается с помощью индивидуального привода, состоящего из электромотора постоянного тока мощностью в 0,7 квт, реостата и редуктора, обеспечивающих изменение линейной скорости в пределах от 2,3 до 26 см/сек.

Нехлорированная и некоагулированная вода подается насосом из озера по трубопроводу в промежуточный бак. Из этого бака вода подается самотеком по трубопроводу в центральную трубу-ось барабана и через перфорированную часть поступает во внутреннюю полость непрерывновращающегося барабана.

При прохождении воды через микросетку, размещенную между двумя поддерживающими сетками, из задержанных планктона и грубодисперсных частиц образуется тонкий слой на внут-

ренной поверхности микросетки. В начальный период фильтрования задерживаются частицы более крупные, чем размеры отверстий микросетки. Из этих частиц образуется пленка, которая задерживает более мелкие частицы.

Барабан, вращаясь, подводит загрязненные фильтрующие элементы к промывному устройству, расположенному над верхней частью барабана.

Целью наших исследований было выяснение максимальной эффективности микрофильтрации на Таллинской водоочистой станции и на основе полученных опытных данных определить закономерность оптимального режима работы микрофильтров.

Ниже приводятся результаты исследований по микрофильтрации на МФ-2. Период исследований характеризовался цветением воды в озере Клемисте диатомовыми, зелеными и особенно сине-зелеными водорослями. Преобладающими формами фитопланктона оказались:

Название фитопланктона	Характерные размеры клеток, мкм
<i>Microcystis aeruginosa</i>	диаметр 3 - 7
<i>Anabaena</i>	диаметр 8 - 12
<i>Oscillatoria</i>	2,5- 4
<i>Lyngbya</i>	1,5- 5

Как видно, в озерной воде находятся очень мелкие формы фитопланктона. Суммарная численность фитопланктона в исходной воде в период исследований колебалась в пределах от 2570 до 223 600 клеток в 1 см<sup>3</sup>, количество взвешенных веществ - в пределах от 2 до 51,2 мг/л. Максимальная температура воды была 21,8°C, а минимальная - 1,8°C.

В период исследований было проведено 478 опытов, причем для каждого опыта определялось количество взвешенных веществ в исходной воде, а также в фильтрате. Из 478 опытов в 188-ми была определена численность фитопланктона. Исследования проводились при расходе воды, протекавшей через мик-

рофилтр, от 40 до 100 м<sup>3</sup>/час, а в отдельных опытах до 120 м<sup>3</sup>/час, что соответствует интенсивности фильтрации от 8,78 до 30,82 л/сек на 1 м<sup>2</sup> полезной (погруженной в воду) площади микросетки. Потеря напора ( $\Delta H$ ) находилась в пределах от 1 до 17 см и линейная скорость вращения барабана ( $u$ ) от 2,3 до 26 см/сек.

В начале была исследована возможность изменения потери напора в микрофилтре с помощью промывного потока таким образом, чтобы величина  $\Delta H$  зависела от степени отмывки микросетки. Скорость вращения барабана была постоянной ( $u = \text{const.}$ ). При этом были получены неудовлетворительные результаты: удаление фитопланктона менее 50%.

Одной из причин низких результатов являлась плохая конструкция промывной системы щелевого типа, которая не обеспечивала равномерную отмывку микросетки. Была построена новая промывная система также щелевого типа, которая дала равномерную отмывку микросетки, но щель (шириной 0,1мм) довольно часто засорялась.

Далее исследовался рабочий режим микрофилтра при полной отмывке пленки, а потеря напора ( $\Delta H$ ) регулировалась с помощью скорости вращения барабана. При этом удаление взвешенных веществ возросло в среднем на 40%, а удаление фитопланктона в среднем на 70%.

По видам фитопланктона среднее удаление было следующим: сине-зеленый - 74%, диатомовый - 63%, зеленый - 56%.

Содержащийся в исходной воде зоопланктон при микрофильтрации задерживался полностью.

При обработке опытных данных выяснилось, что эффект очистки воды зависит, в первую очередь, от характера пленки, образующейся на поверхности микросетки. Характер пленки зависит от множества факторов, а именно: от величины ячеек микросетки, количества и характера фитопланктона, количества и характера взвешенных веществ, расхода воды, температуры воды, скорости вращения барабана микрофилтра и интенсивности промывки.

Одним из основных показателей, характеризующих пленку, является ее гидравлическое сопротивление.

В ранее опубликованной статье [10] дана методика для определения сопротивления чистой микросетки, а также для определения сопротивления пленки на стационарной установке. В последнем случае использовалась богатая планктоном озерная вода, которая питает Таллинскую водоочистную станцию.

Для характеристики закономерностей сопротивления в пленке при микрофильтрации найдена зависимость [10]

$$\frac{\Delta H}{W\sqrt{v}} = f(Wt), \quad (1)$$

где  $W$  — средняя скорость подхода воды, т.е. скорость, отнесенная к поверхности сетки (см/сек);

$v$  — кинематический коэффициент вязкости (см<sup>2</sup>/сек);

$t$  — время образования пленки;

$Wt$  — объем воды, прошедшей через сетку, редуцирован на единицу площади микросетки (см).

Величина  $\frac{\Delta H}{W\sqrt{v}}$  выражает гидравлическое сопротивление в пленке, которое повышается с увеличением  $Wt$ . Установлено также, что на изменение  $\Delta H$  оказывает влияние количество взвешенных веществ ( $M$ ) в фильтруемой воде (мг/л).

Как было указано выше, фитопланктон и взвешенные вещества лучше всего удалялись на микрофильтре при полной отмывке пленки после окончания фильтроцикла, т.е. в том случае, когда микросетка в начале фильтрации была совершенно чистой. При фильтрации сразу начинается образование пленки, которая постепенно растет по периметру и достигает максимальной толщины при выходе сетки из воды.

Время фильтроцикла ( $T$ ) получаем из соотношения

$$T = \frac{S}{u}, \quad (2)$$

где  $S$  — длина погруженной части периметра (м).

По аналогии с выражением (1) сопротивление пленки вращающегося микрофильтра можно представить в виде

$$\frac{\Delta H}{WV} - \chi_c = f(MWT) , \quad (3)$$

где  $\chi_c$  — сопротивление чистой микросетки, для сетки 004  $\chi_c = 35 \text{ (сек/см)}^2$ .

Величины в левой части выражения (3) характеризуют процесс микрофильтрации в виде гидродинамических факторов. В правой части произведение MWT выражает нагрузку микросетки  $(\text{мг/см}^2)$ .

При обработке экспериментальных данных выяснилось, что величины M (мг/л) и N (численность фитопланктона в исходной воде, клеток/мл) не отражают с достаточной точностью характер взвеси и структуру пленки, так как отдельные клетки фитопланктона и другие микроскопические частицы имеют разнообразие формы. Однако других, более подходящих показателей не имеется.

В таких условиях единственным способом для анализа опытных данных является статистический метод, требующий наличия богатого экспериментального материала.

В ходе работы выполнено 1202 анализа взвешенных веществ и 389 анализов фитопланктона. Опыты производились в различных условиях и на разных режимах микрофильтрации.

При анализе экспериментальных данных величины MWT,  $\alpha W T$ ,  $E_M$  и  $E_N$  распределялись по интервалам  $\frac{\Delta H}{WV}$  и определялись их среднеарифметические значения. Здесь  $\alpha = M - M_1$ ,  $M_1$  — количество взвешенных веществ в фильтрате (мг/л);  $E_M$  — эффект очистки воды в процентах по задержанию взвешенных веществ;  $E_N$  — эффект очистки воды в процентах по задержанию фитопланктона.

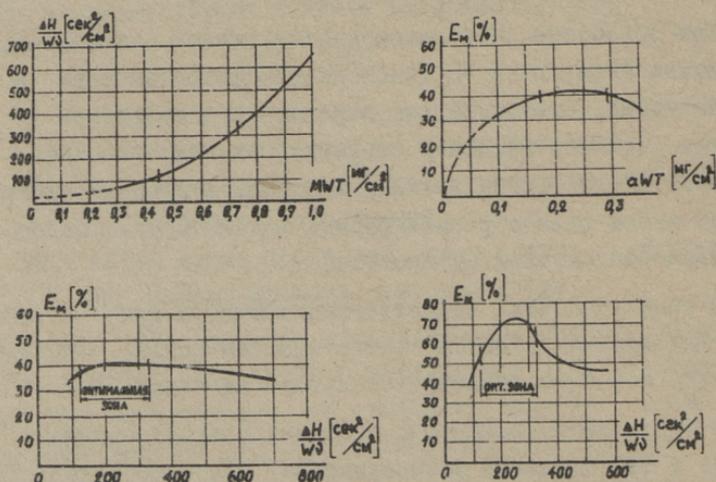
На фиг. I изображены полученные закономерности

$$\frac{\Delta H}{WV} = f(MWT) \quad (4)$$

$$E_M = f(\alpha WT) \quad (5)$$

$$E_M = f\left(\frac{\Delta H}{WV}\right) \quad (6)$$

$$E_N = f\left(\frac{\Delta H}{WV}\right) \quad (7)$$



Фиг. 1

Как видно из фиг. 1, графики, выражающие эффект очистки воды, имеют пределы оптимальной рабочей зоны. Это объясняется следующим: при малых нагрузках (т.е.  $MWT$  и  $\alpha WT$  малы) пленка слишком тонкая и не может обеспечить необходимый эффект очистки; при больших нагрузках растет равномерность скоростей фильтрации по периметру (погруженной в воду части) микрофильтра.

В данном случае величины  $MWT$  и  $\alpha WT$  отражают среднюю нагрузку по периметру.

Ясно, что в начале рабочего цикла  $MWT = 0$ , а в конце цикла нагрузка большая. Соответствующие расчеты показывают, что при оптимальном режиме на одну ячейку микросетки в пленке приходится в среднем 70-200 клеток фитопланктона. При выходе из воды на микросетке это число в несколько раз выше и может случиться, что фильтрация через сетку в конце рабочего цикла практически прекращается. Вместе с тем уменьшается рабочая площадь микросетки и эффект очистки снижается.

Вышеуказанные обстоятельства определяют пределы оптимального режима.

В ходе опытов установлено также, что при  $\Delta H > 11$  см пленка не является стабильной и обуславливает колебания. Это объясняется тем, что при больших  $\Delta H$  часть пленки продавливается через сетку, ввиду чего затрудняется сохранение оптимального режима, усложняется эксплуатация и автоматизация установки.

Полученные закономерности позволяют составить теоретически обоснованный график работы микрофильтра.

Следует отметить, что хотя в данном случае и были получены лучшие результаты при полной отмывке пленки, то при надежной конструкции промывного устройства, обеспечивающей равномерную промывку с частичным сохранением пленки, по всей вероятности можно получить такие же хорошие результаты.

При полной отмывке пленки фактический расход промывной воды в среднем не превышал 1,5 - 2% от общей производительности микрофильтра.

#### Л и т е р а т у р а

1. В.Ф. Соколов. Применение микрофильтраций для очистки питьевых и сточных вод (литературный обзор). Сборник научных работ, вып. I ОНТИ АРХ, 1960.

2. P.L. Boucher. A New measure of the Filtrability of Fluids with Applications to water Engineering, 1947. Journal of the Institution of Civil Engineers, vol. 27, Nr.4.
3. P.L. Boucher. Micro-straining 1961. Journal of the Institution of Public Health Engineers, vol. 60, X.
4. В.Ф Соколов, Б.Д. Жибицкий, С.А. Шуберт. К вопросу о предварительной обработке воды на водоочистных станциях хозяйственно-питьевых водопроводов. "Водоснабжение" №4, Научные труды, вып. XXX ОНТИ АКХ, М. - Л., 1964.
5. Walter Bartzch. Versuche zur Vorreinigung von Oberflächenwassermittels Mikrosiebfilter Wasserwirtschaft. Wassertechnik 1961, Nr.9.
6. В.Ф. Соколов. Результаты экспериментальных исследований по микрофильтрации воды. Сборник научных работ. "Водоснабжение" № 2, вып. УШ ОНТИ АКХ, 1961.
7. В.Ф. Соколов. Микрофильтрация как средство удаления из воды планктона на водоочистных станциях. Техническое совещание (краткие тексты докладов и сообщений на совещании 22-25 февраля 1965 г.). Союзводоканалниипроект, М., 1965.
8. A.E. Berry, Removal of algae by microstrainers Journal of the Americ. Water Works Association, 1961, vol.53, Nr.12.
9. В.Ф. Соколов и М.И. Прахова. Исследования по микрофильтрации воды по полупроизводственной установке. "Водоснабжение" №4. Научные труды, вып. XXX. ОНТИ АКХ, М. -Л., 1964.
10. Х.Я. Лонд, Л.А. Тепакс. Экспериментальное исследование потерь напора на микрофильтрах. Труды ТПИ, серия А, №223. Сборник статей по санитарной технике II, Таллин, 1965.

УДК 532.542

Г.С. Иерет

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ВОЗДУХОВОДОВ,  
ПЕРЕМЕЩАЮЩИХ НАСЫЩЕННЫЙ ВЛАГОЙ ВОЗДУХ

В предприятиях текстильной, целлюлозно-бумажной, химической и пищевой промышленности часто встречаются воздуховоды, где температура перемещаемого насыщенного влагой воздуха достигает  $60^{\circ}\text{C}$ . Так как температура среды, окружающей воздуховод, всегда ниже, то благодаря теплообмену температура перемещаемого воздуха понизится и выпадавшая из него влага конденсируется на внутренней поверхности воздуховода.

Из трудов, посвященных изучению теплоотдачи влажного воздуха, известно, что в данном случае имеется дело с капельной конденсацией. Так как характерная высота капель во много раз превышает среднюю высоту неровностей материала, из которого сделан воздуховод, то, следовательно, увеличивается шероховатость воздуховода, которая в свою очередь влияет на потерю трения. Предварительные аэродинамические обследования упомянутых вентиляционных установок показали, что они работают неудовлетворительно, видимо за счет повышенных потерь на трение, причем их производительность меньше проектной.

Влияние капельной конденсации на аэродинамический режим воздуховодов пока не изучено. Так как мною начата работа в этом направлении, то из сделанного можно сказать следующее.

Первым вопросом, с которым приходится сталкиваться при аэродинамических расчетах воздухопроводов, по которым перемещается влажный воздух, является вопрос вязкости перемещаемого воздуха. В настоящее время в основу расчетов берут вязкость сухого воздуха. Известно, что влажный воздух (ВВ) представляет собой смесь из сухого воздуха (СВ) и водяного пара (ВП). Так как вязкость водяного пара отличается от вязкости сухого воздуха, то, следовательно, вязкость влажного воздуха тоже отличается от вязкости сухого воздуха. Отсутствие достоверных данных о непосредственном измерении вязкости влажного воздуха в настоящее время не позволяет оценить величину погрешностей в упомянутых расчетах.

В литературе имеется ряд формул для расчета вязкости смеси из газов. Наиболее простыми из них являются формулы Манна, которые попросту суммируют парциальные вязкости компонентов, т.е. итоги расчетов совпадают с результатами, рассчитанными по правилу аддитивности. Из теоретических и экспериментальных исследований известно, что вязкость газовых смесей связана с возникновением направленного переноса количества движения из одного слоя газов в другой. Тем самым правило аддитивности к формуле Манна не применимо.

На основании упрощенной молекулярно-кинетической теории была выведена Сатерлэндом формула для расчета динамической вязкости ( $\eta$ ) смеси газов, которая учитывает кроме концентрации компонентов в смеси и разницу в диаметрах ( $\delta$ ) и массах ( $m$ ) молекул, а также силы взаимодействия между молекулами компонентов ( $\Omega$ ). Для влажного воздуха она имеет вид:

$$\eta_{ВВ} = \frac{\eta_{СВ}}{1 + \frac{n_{ВП}}{n_{СВ}} A_{СВ}} + \frac{\eta_{ВП}}{1 + \frac{n_{СВ}}{n_{ВП}} A_{ВП}}, \quad (I)$$

$$\text{где } A_{СВ} = \left( \frac{\delta_{СВ} + \delta_{ВП}}{2\delta_{СВ}} \right)^2 \frac{1 - \frac{m_{СВ}}{m_{СВ} + m_{ВП}} \Omega}{0,797} \sqrt{\frac{m_{СВ} + m_{ВП}}{2m_{ВП}}} \frac{\chi_{ВВ}}{\chi_{СВ}},$$

$$\Omega_{\text{св}} = \frac{m_{\text{св}}}{2(m_{\text{св}} + m_{\text{вп}})} + \frac{1}{4} \frac{m_{\text{св}}^2}{(m_{\text{св}} + m_{\text{вп}})^3 m_{\text{вп}}} \lg \frac{\sqrt{m_{\text{св}} + m_{\text{вп}}} + \sqrt{m_{\text{вп}}}}{\sqrt{m_{\text{св}} + m_{\text{вп}}} - \sqrt{m_{\text{вп}}}}$$

$$\chi_{\text{св}} = 1 + \frac{C_{\text{св}}}{T}$$

$n$  — число молекул в единице объема,  
 $C$  — постоянная Сатерленда.

Для проведения расчетов по формуле (I) в нее были введены численные значения постоянных величин. Тогда она приняла вид:

$$\eta_{\text{св}} = \frac{\eta_{\text{св}}}{1 + 0,2687 \frac{p_{\text{вп}}}{p_{\text{св}}} \left( \frac{T + 3,69T^{0,7}}{T + 106,8} \right) \left( 1 + 0,718 \sqrt{\frac{T + 961}{T + 119}} \right)^2} + \frac{\eta_{\text{вп}}}{1 + 0,2569 \frac{p_{\text{св}}}{p_{\text{вп}}} \left( \frac{T + 3,69T^{0,7}}{T + 0,138T^{1,4}} \right) \left( 1 + 1,392 \sqrt{\frac{T + 119}{T + 961}} \right)^2} \quad (1')$$

где  $p$  — парциальное давление компонента в смеси.

Сравнение итогов расчетов по формуле (I') с данными, полученными расчетом на основе строгой молекулярно-кинетической теории газов, дало хорошее совпадение.

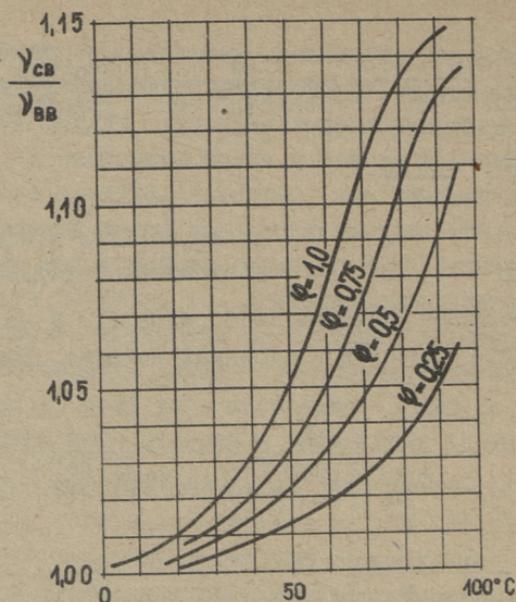
Из вышеупомянутых экспериментальных работ известно, что

$$\eta_{\text{с действ}} < \eta_{\text{с аддит}}$$

При проведенных расчетах это условие было соблюдено, так как,

$$\eta_{\text{вв расч}} < \eta_{\text{вв аддит}}$$

Целью упомянутых расчетов было выяснение величин погрешностей, вызываемых пренебрежением влияния водяного пара, содержащегося во влажном воздухе, на вязкость последнего. Как видно из фиг. I, где представлены соотношения между кинематической вязкостью сухого и влажного воздуха, погрешность при температуре 60°C для насыщенного воздуха составляет ~ 7,5%. Располагая вышеприведенным графиком



Фиг. 1. Соотношение между кинематической вязкостью сухого и влажного воздуха в зависимости от температуры при барометрическом давлении 760 мм рт.столба

(фиг. 1), можно уточнить как аэродинамические расчеты воздухопроводов, так и обработку экспериментов по нахождению коэффициентов сопротивления трения.

Как было уже сказано выше, перемещение насыщенного воздуха в неизотермических условиях сопровождается выпадением влаги. Процесс конденсации начинается с тем, что стенки воздухопровода с внутренней стороны покрываются адсорбированным мономолекулярным слоем водяного пара, который затем уплотняется в тонкую жидкую неустойчивую пленку толщиной порядка одного микрона. Зародыши капель образуются за счет самопроизвольного разрыва пленки. Дальнейший рост капли происходит за счет конденсации пара на его поверхности. По достижении определенного размера, капля под действием силы тяжести скатывается по периметру вниз, образуя на дне воздухопровода общий конденсатный ручей. Одновременно на освобо-

дившейся поверхности растёт новая пленка и весь процесс повторяется. Тем самым капельная конденсация является нестационарным процессом. Однако осредненные во времени характерные размеры капель постоянные, и в дальнейшем рассмотрим процесс с точки зрения шероховатости как квазистационарный.

Известно, что с твердой поверхности, наклоненной под углом  $\alpha$  к горизонту, скатывание капли начинается тогда, когда работа силы тяжести, совершаемая при перемещении капли, становится равной или большей работы, затрачиваемой против сил адгезии ( $W_A$ ) ее заднего края к данной твердой поверхности, т.е.

$$\sin \alpha = \frac{2 R_{\text{кон}} W_A}{G_{\text{кр}}} \quad (2)$$

Средний статистический критический вес капли ( $G_{\text{с-кр}}$ ) по внутреннему периметру воздуховода определяется путем введения для  $\alpha$  значения от 0 до  $2\pi$  в формуле (2).

Время образования упомянутой капли ( $\tau_{\text{с-кр}}$ ) подсчитывается по формуле

$$\tau_{\text{с-кр}} = R_{\text{с-кр}}^2 \frac{r \gamma_k (1 - \cos \theta)}{\lambda_k (T_{\text{п}} - T_{\text{ст}})} f(\cos \theta; B_i), \quad (3)$$

где  $r$  - скрытая теплота парообразования,

$\gamma_k$  - удельный вес конденсата,

$\lambda_k$  - теплопроводность конденсата,

$T_{\text{п}}$  - температура насыщения,

$T_{\text{ст}}$  - температура стенки воздуховода,

$f(\cos \theta; B_i)$  - член, учитывающий влияние диффузионного пограничного слоя на границе раздела фаз. В случае насыщенного воздуха  $f(\cos \theta; B_i) \approx 0,2$ .

Радиус капли, осредненный во времени ( $R_{\text{ос}}$ ), определяется из условия

$$\tau_{\text{ос}} = \frac{\tau_{\text{с-кр}}}{2}$$

Следовательно,

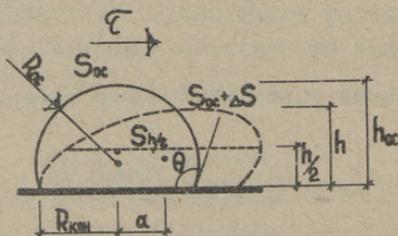
$$R_{\text{ос}} = 0,706 R_{\text{с-кр}}$$

Внутренние стенки воздуховода с точки зрения смачивания всегда загрязненные, т.е. покрыты тончайшим слоем масла и т.п. Поэтому они становятся в отношении воды (конденсата) гидрофобными и краевой угол смачивания  $\theta \approx 106^\circ$ .

С точки зрения шероховатости требуется знать осредненную во времени высоту капли ( $h_{oc}$ ), выражаемую формулой

$$h_{oc} = R_{oc} [1 + \sin(\theta - 90^\circ)] . \quad (4)$$

С увеличением скорости перемещаемого по воздуховоду воздуха повышается касательное напряжение на стенке ( $\tau_0$ ). Так как капли конденсата не жесткие, то благодаря трению потока о поверхности они в осевом направлении воздуховода деформируются, причем высота уменьшается, как это видно из фиг. 2



Фиг. 2. Изменение формы капли от касательного напряжения потока

При сплющивании поверхность капли увеличивается на  $\Delta S$  ввиду постоянства объема. Затрата работы для преодоления поверхностного напряжения ( $\sigma$ ) составляет

$$W_\sigma = \sigma \cdot \Delta S . \quad (5)$$

Учитывая, что в пределах высоты капли касательное напряжение меняется незначительно, в дальнейшем за основу расчета взята  $\tau_0$ . Условно считаем, что оно действует на плоскость ( $S_{h/2}$ ), которая расположена параллельно стенке и ограничена периметром на высоте  $h/2$ . Ввиду сплющивания капля удлиняется и центр тяжести перемещается на от-

резок  $\alpha$ , причем затрачивается работа

$$W_{\tau} = \tau_0 \cdot S_{h/2} \cdot \alpha \quad (6)$$

На основании баланса энергии  $W_G = W_{\tau}$  и

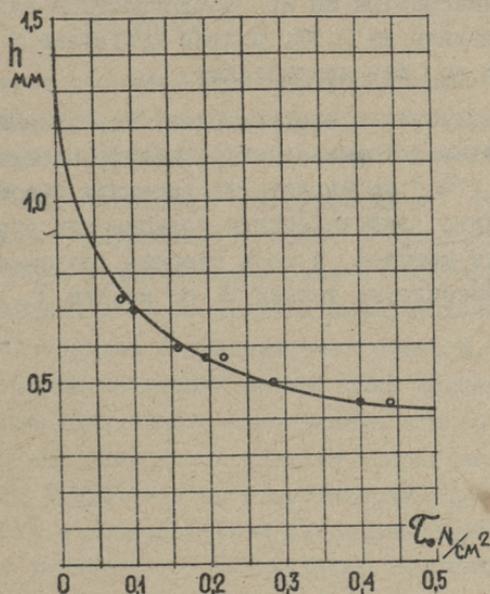
$$\tau_0 = \sigma \frac{\Delta S}{\alpha \cdot S_{h/2}} \quad (7)$$

Так как изменение геометрических размеров капли является функцией от касательного напряжения, то с учетом

$$\sigma = 7,15 \text{ N/cm}^2 \quad \text{и} \quad R_{\text{ос}} = 0,11 \text{ см}$$

и путем соответствующих преобразований, характерная высота капли выражается формулой

$$h = \frac{0,326}{\sqrt[3]{\tau_0}} \quad (7')$$



Фиг. 3. Характерный размер (высота капли) в зависимости от касательного напряжения на стенке воздуховода

На фиг. 3 представлены зависимость  $h = f(\tau_0)$ , построенная по формуле (7'), и результаты опытов.

Шероховатость, вызванная капельной конденсацией, по своей геометрической характеристике больше похожа на равномерную зернистую шероховатость, чем на техническую. Поэтому при обработке опытов за основу приняты кривые  $\lambda = f \left( Re; \frac{R}{K} \right)$ , построенные Никурадзе. Непосредственное измерение высоты капелек внутри воздуховода связано с большими техническими трудностями. Поэтому во время опытов измеряли расход и потери давления и высчитывали по ним соответствующие  $\lambda$  и  $Re$ , по которым характерная высота капель определялась как равномерная зернистая шероховатость по вышесказанным кривым.

Кривая, представленная на фиг. 3, построена для определенной температуры конденсата ( $309^{\circ}K$ ). Учитывая, что при понижении температуры на  $20^{\circ}$  поверхностное натяжение увеличивается только на 2,4%, вполне допустимо в практике пользоваться ею без исправлений.

При проектировании воздухопроводов, перемещающих насыщенный воздух в неизотермических условиях, следует при помощи кривой  $h = f(\tau_0)$  определить характерную высоту капель, т.е. определить эквивалентную равномерную зернистую шероховатость, по которой в свою очередь определяется коэффициент сопротивления трения  $\lambda$  по кривым  $\lambda - Re$  Никурадзе.

УДК 532.5

Л.А. Тепакс

### КРИТИКА ФОРМУЛЫ ШЕЗИ

Гидравлический расчет безнапорных водоводов производится свыше ста лет по формуле Шези

$$Q = c\omega\sqrt{R_i}. \quad (1)$$

В начале этого столетия этой формулой стали пользоваться при расчете напорных трубопроводов, причем скоростной множитель  $c$  определялся обычно по формуле Маннинга (3).

Вследствие многочисленных исследований по турбулентному напорному движению жидкости (основные результаты которых были получены в 30-х годах этого столетия) появились новые понятия: абсолютная и относительная шероховатости, гладкостенная, доквадратичная и квадратичная области сопротивления. Исследованиями последних десятилетий выяснено, что трубопроводы разных назначений, находящиеся в эксплуатации, работают часто в доквадратичной области сопротивления. При этом в расчетах коэффициентов сопротивления требуется учет влияния вязкости и скорости (или гидравлического уклона). Это требование узаконено в СССР нормами проектирования водоснабжения и канализации (формулы Ф.А. Шевелева, Н.Ф. Федорова). За рубежом, по литературным данным, в гидравлических расчетах доминирует "универсальная" формула Колбрука (10). Формулой Шези с ее многочисленными вспомогательными формулами (Маннинга и др.) в настоящее время при расчете напор-

ных потоков почти не пользуются.

Исследования последних лет показывают, что безоговорочное распространение результатов, полученных при изучении сопротивления круглых напорных труб, на безнапорные потоки (путем замены диаметра трубы гидравлическим радиусом открытого потока) не приводит к удовлетворительным результатам.

В настоящее время расчет открытых русел производится по формуле Шези (I). Величину скоростного множителя  $c$  (коэффициента Шези), входящего в эту формулу, наиболее часто вычисляют по формулам

$$\text{Н.Н. Павловского} \quad c = \frac{1}{n} R^y, \quad (2)$$

$$\text{Р. Маннинга} \quad c = \frac{1}{n} R^{1/6}, \quad (3)$$

$$\text{Ф. Форхгеймера} \quad c = \frac{1}{n} R^{1/5}. \quad (4)$$

Согласно этим формулам коэффициент Шези  $c$  является функцией шероховатости ( $n$ ) и геометрических размеров сечения ( $R$ ). Поэтому считают, что эти формулы справедливы только для квадратичной области сопротивления.

Покажем, что формулы (2), (3) и (4) могут отражать не только квадратичную, но и докватратичную, а также и гладкую области сопротивления.

Особенностью исследований по равномерному движению безнапорных потоков является специфическая методика постановки опытов. Лоток определенного сечения и с определенной шероховатостью устанавливается с постоянным уклоном. В лоток пускают разные расходы воды  $Q$  и определяют нормальную глубину потока  $h_0$ . Таким образом получают серию опытов с постоянным уклоном и абсолютной шероховатостью. Именно так проводились классические опыты Базена [10], взятые за основу при составлении вышеупомянутых формул (2), (3) и (4), а также большое количество лабораторных исследований (например, исследование А.П. Зегжды [2]).

Вязкость изменяется обычно в небольших пределах. Основным результатом опытов такого рода является зависимость  $Q(h_0)$ , подлежащая дальнейшей обработке.

В отличие от опытов по напорному движению характерным является то, что с ростом  $Q$  и  $h_0$  возрастает число Рейнольдса  $Re$  и одновременно уменьшается относительная шероховатость  $\frac{\lambda}{R}$ . Это обстоятельство затрудняет обработку опытов и может привести к неправильным выводам.

В качестве примера (фиг. I) приводим серии № 12, 13 и 14 исследования А.П. Зегжды [2], полученные для лотков прямоугольного сечения с одинаковым уклоном  $i = 0,0005$  и с гладкими поверхностями (стекло). На основе обработки опытов А.П. Зегжда предложил пользоваться для открытых потоков с гладкими стенками формулой Прандтля-Никурадзе, полученной для гладких труб круглого сечения

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -0,8 + 2 \lg(Re \sqrt{\lambda}). \quad (5)$$

В пределах опытных значений  $Re$  формулу (5) можно заменить формулой Блазиуса

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}}. \quad (6)$$

Как видно из фиг. I-a\*, опытные точки расположены несколько выше прямой Блазиуса; автор исследования объясняет это неточностями постановки опытов.

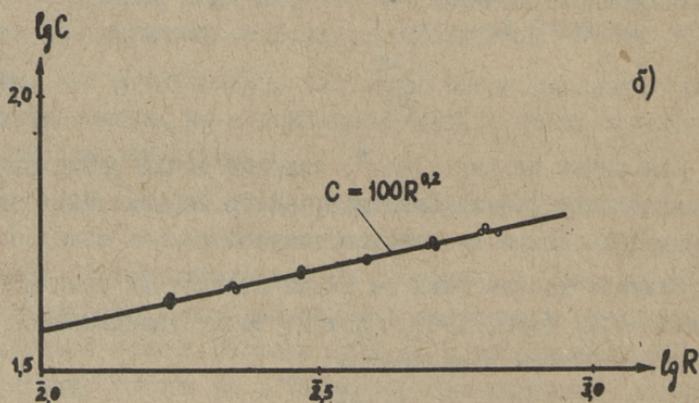
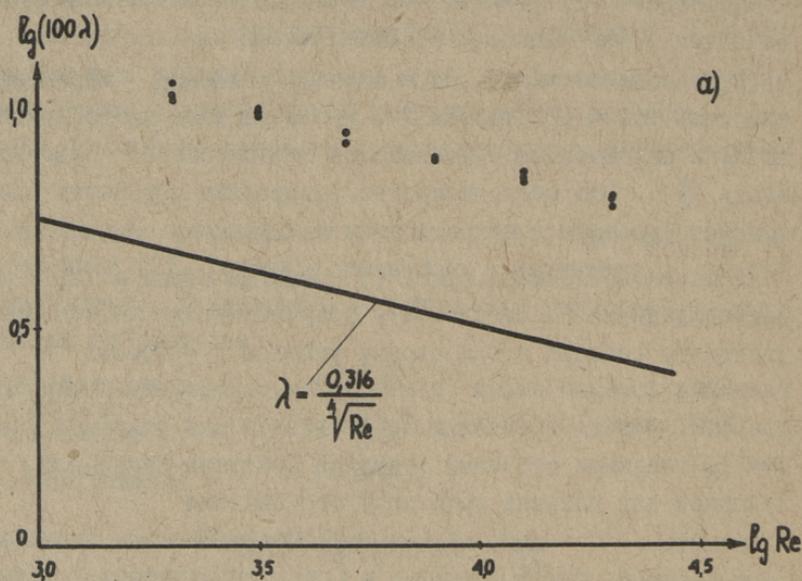
Опытные данные этих же серий обработаны нами в координатах  $\zeta(R)$  (фиг. I-б). Опытные точки укладываются на прямую, отвечающую зависимости

$$\zeta = 100 R^{0,2},$$

т.е. формуле Форхгеймера (4) с коэффициентом шероховатости  $\eta = 0,010$ , что отвечает гладким поверхностям по общеизвест-

---

\* В настоящей работе  $\lambda$  и  $Re$  выражены через гидравлический диаметр  $D = 4R$



Фиг. 1. Коэффициенты сопротивления широких гладких прямоугольных русел серий №12, 13 и 14 исследования А.П.Зегжды [2].  
 $\alpha$  - в координатах  $\lambda(Re)$ , б - те же данные в координатах  $C(R)$ .

ной шкале шероховатости.

Таким образом, пользуясь явно неправильной методикой обработки опытов, мы получили вполне "правильный" результат.

Можно доказать, что полученное не является случайным совпадением.

Пользуясь формулой Блазиуса, можно выразить коэффициент Шези в виде

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} = \left(\frac{8g}{0,316}\right)^{1/2} Re^{1/8}$$

Заменой

$$v = C\sqrt{R_i}$$

получаем после преобразований

$$C = 4^{1/7} \left(\frac{8g}{0,316}\right)^{4/7} v^{-1/7} \cdot i^{1/4} R_i^{3/4} \quad (7)$$

Сравнение с формулой Н.Н. Павловского (2) приводит к зависимостям

$$\begin{aligned} y &= \frac{3}{14} = 0,214, \\ \eta &= 4^{-1/7} \left(\frac{8g}{0,316}\right)^{-4/7} v^{1/7} \cdot i^{-1/4} = 0,0351 v^{1/7} \cdot i^{-1/4}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $v$  - в  $m^2/сек.$

Как видно, для серии опытов с постоянным уклоном и вязкостью получаем постоянное значение  $\eta$ .

Опыты проводятся обычно с водой при температурах  $t = 0-20^\circ$ . Коэффициент вязкости меняется соответственно в пределах  $\nu = (1,01 - 1,78) \cdot 10^{-6} m^2/сек.$ , а  $\nu^{1/7} = 0,139-0,151$ . Из этого следует, что вязкость в обычных условиях сравнительно мало влияет на коэффициент шероховатости при определении последнего по выражению (8). Если взять в среднем  $t = 10^\circ$ ,  $\nu = 1,31 \cdot 10^{-6} m^2/сек.$ ,  $\nu^{1/7} = 0,144$ , то возможные расхождения будут в пределах до 5%.

Рассмотрим влияние уклона  $i$  на  $\eta$ . Отметим прежде всего, что если в опытах по напорным трубам гидравлический уклон меняется в сравнительно больших пределах, то в условии

открытых потоков это невозможно. Минимальный уклон ограничен тем обстоятельством, что для его определения с приемлемой точностью требуется большая длина лотка с сохранением постоянного уклона по всей его длине. Это вызывает необходимость выполнения очень тщательного монтажа. По этой причине использование уклонов менее чем  $i = 0,0001$  вряд ли возможно.

Максимальный уклон, согласно литературным данным, достигает величины  $i = 0,1 - 0,2$ . Однако при больших скоростях наблюдается волнистость поверхности и явление аэрации, что искажает результаты опытов. В последнее время все чаще высказывается мнение, что при бурном течении гидравлический уклон зависит от числа Фруда [1], [3], [11], [13] и что сопротивление бурных потоков больше сопротивления спокойных потоков. Этот вопрос является пока спорным. Поэтому в настоящем труде ограничимся рассмотрением спокойных потоков.

Критический уклон имеет выражение

$$i_k = \frac{g}{\alpha C_k^2} \frac{\chi_k}{B_k} = \frac{\lambda_k}{8\alpha} \frac{\chi_k}{B_k}. \quad (9)$$

Переход от ламинарного режима к турбулентному происходит обычно в пределах  $Re = 2000 - 5000$ . Если взять за основу  $Re = 5000$ , то максимально возможное значение  $\lambda$  для гладких русел по (6) будет  $\lambda = 0,0376$ , и при  $\alpha = 1,1$

$$i_k = 0,00427 \frac{\chi_k}{B_k}.$$

Учитывая, что  $\frac{\chi}{B} > 1$ , возьмем ориентировочно  $i = 0,005$ . Эту величину можно рассматривать как максимальный уклон, при котором возможно спокойное течение в гладких руслах.

При уклонах, изменяющихся в пределах  $i = 0,0001 - 0,005$ , коэффициент шероховатости  $n$ , подсчитанный по выражению (8), получается (при  $t = 10^0$ ) в пределах  $n = 0,0074 - 0,0098$ . Многочисленные опыты по гладким руслам [5], [13], [14] показывают, что опытные точки расположены в большинстве слу-

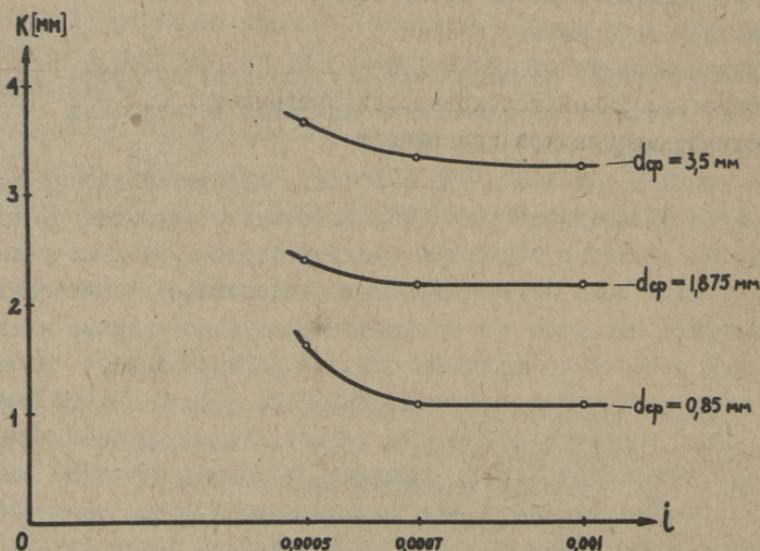
чаев несколько выше прямой Блазиуса (как в опытах А.П. Зегжды [2]), что объясняется влиянием формы сечения. Поэтому коэффициенты шероховатости могут иметь и большие значения. Нет ничего удивительного в том, что в таблицах коэффициентов шероховатости для гладких поверхностей рекомендуются величины  $n = 0,009$  и  $n = 0,010$ .

Таким образом формулы типа (2) могут быть в определенных условиях справедливыми не только для квадратичной, но и для гладкой области сопротивления. Понятно, что эти формулы могут отражать и промежуточную — доквadraticную область.

Квадратичная область отвечает условию, согласно которому коэффициент сопротивления является независимым от числа Рейнольдса при равных относительных шероховатостях. Для установления закономерности квадратичного сопротивления в открытых руслах требуется провести множество опытных серий с разными уклонами. Такого рода систематических исследований в литературе сравнительно мало и в большинстве случаев наличие квадратичной области не доказывается. Подробный анализ этого вопроса приводится в статье А. Маастика [6]. Из этого анализа можно заключить, что если не все, то по крайней мере большинство опытов Базена охватывают доквadraticную область. Следует добавить, что анализ такого рода затруднен влиянием формы сечения и возможным влиянием числа Фруда.

Наиболее существенным доказательством существования квадратичной области в открытых потоках считают исследование А.П. Зегжды [2], в котором изучалось сопротивление широких прямоугольных лотков с равнoзернистой песчаной шероховатостью в условиях спокойного течения. Учет шероховатости по фактической толщине шероховатого слоя дал значительный разброс опытных точек. По этой причине А.П. Зегжда определял абсолютную шероховатость косвенным путем, исходя из принципа независимости сопротивления от шероховатости при ламинарном движении жидкости.

Анализируя опытные данные нами обнаружен интересный факт: абсолютная шероховатость  $K$ , определенная по методу А.П.Зегжды, зависит от уклона. Эта зависимость изображена на фиг.2 для трех шероховатостей:  $d = 0,7-1,0$  мм,  $d_{cp} = 0,85$  мм,  $d = 1,25-2,5$  мм,  $d_{cp} = 1,875$  мм и  $d = 3-4$  мм,  $d_{cp} = 3,5$  мм. Шероховатости песков с  $d = 0,35-0,6$  мм,  $d_{cp} = 0,475$  мм и  $d = 3,5-4,2$  мм,  $d_{cp} = 3,85$  мм определялись при одном уклоне и поэтому установить их зависимости от уклона оказалось невозможным.



Фиг. 2. Зависимость абсолютной шероховатости  $K$ , определенной косвенным путем, от уклона  $i$ .

Шероховатость, зависящая от гидравлического уклона, противоречит самому физическому понятию шероховатости и поэтому метод косвенного определения шероховатости нельзя признать правильным. К тому же сам принцип независимости сопротивления от шероховатости при ламинарном режиме является неправильным. Он опровергнут исследованием Г.М. Ломизе по движению жидкости в шероховатых щелях [4], а также исследованием

Дан Чен Ву и Э.Ф. Братера [12] по ламинарному движению в шероховатом лотке прямоугольного сечения. В этих исследованиях доказано, что сопротивление возрастает с ростом относительной шероховатости. Ошибка при пренебрежении ее влиянием тем больше, чем больше сама относительная шероховатость.

Из фиг. 64–68 монографии А.П. Зегжда [2] видно, что глубина ламинарного потока при определении абсолютной шероховатости была в пределах до 12 мм. Наибольшие относительные шероховатости отвечают пескам с  $d_{cp} = 3,5$  мм и 3,85 мм и находятся в пределах  $\frac{R}{d_{cp}} = 1,6 - 3,5$ . По Г.М. Ломизе сопротивление при такой шероховатости превышает в 1,3 – 2 раза сопротивление гладкой поверхности.

Согласно выводам А.П. Зегжды, квадратичная область определена условием  $\lg \frac{V_{*K}}{\nu} > 1,65$ . Интересно отметить, что все без исключения точки, отвечающие этому условию, получены с крупными песками ( $d_{cp} = 3,5$  мм и 3,85 мм), т.е. в этих точках скрыты существенные погрешности.

В свете изложенного можно заключить, что выводы А.П. Зегжды, касающиеся квадратичной области, вызывают сомнение. Численные значения, характеризующие эту область, в частности и граница этой области, определены ошибочно.

Остановимся подробнее на докватратичной области сопротивления. Из теории сопротивления напорных потоков круглого сечения известно, что кривые  $\lambda(Re)$  имеют разный вид в зависимости от типа шероховатости. Для труб с техническими шероховатостями зависимость  $\lambda(Re)$  имеет вид монотонно убывающей функции. Появление формулы Колбрука

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left( \frac{\Delta}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right), \quad (10)$$

отвечающей этому условию, открыло в свое время новый подход к гидравлическим расчетам трубопроводов.

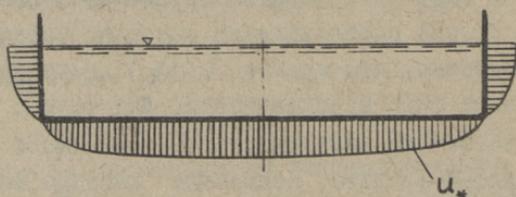
Однако скоро выяснилось, что формула (10) далеко не всегда согласуется с опытными данными, вследствие чего появил-

ся целый ряд новых формул типа Колбрука. В этих формулах характеристикой шероховатости является размер абсолютной шероховатости  $\Delta$ .

В наших ранее опубликованных работах [7], [8] показано, что получить единую формулу для доквадратичной области без дополнительных коэффициентов невозможно. Также невозможно определить единые для всех типов шероховатости пределы доквадратичной области. Отметим, что в формуле Н.Ф. Федорова [9] для расчета канализационных сетей имеется два коэффициента ( $\Delta$  и  $\alpha_2$ ), характеризующие шероховатость. Ф.А. Шевелев составил одинаковые по структуре, но с разными численными коэффициентами формулы для новых и старых стальных и чугунных труб, а также для асбестоцементных труб.

Гидравлический расчет труб в доквадратичной области сложнее расчета в квадратичной области. В случае открытых потоков этот вопрос еще сложнее вследствие неравномерного распределения касательных напряжений по периметру сечения потока.

Следует отметить, что систематических исследований по распределению касательных напряжений в литературе почти не имеется. Р. Смутек [15] пришел к выводу, что динамическая скорость распределяется вдоль периметра прямоугольного сечения приблизительно по логарифмическому закону (фиг. 3);



Фиг. 3. Распределение динамических скоростей  $u_*$  по периметру прямоугольного сечения (по Р.Смутеку [15]).

при этом не учитывается влияние свободной поверхности и вторичных течений.

Известно [8], что граничные условия турбулентного потока определяются для определенной шероховатости величиной  $\frac{c_x \Delta}{\sqrt{\nu}}$ . В случае круглого сечения, т.е. осесимметричного потока, отдельные области турбулентного сопротивления наступают одновременно по всему периметру.

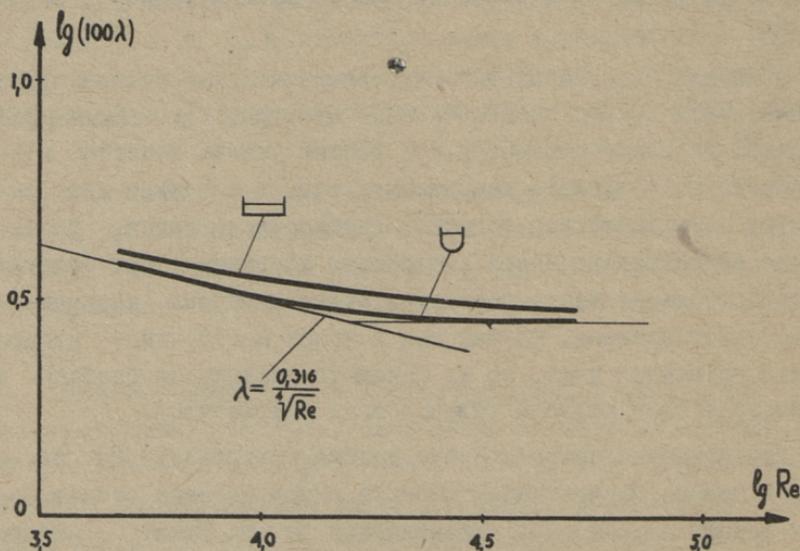
Предположим, что в лотке прямоугольного сечения гидравлический уклон будет всемерно увеличиваться, а глубина потока при этом сохранится постоянной. Вместе с уклоном будет возрастать средняя динамическая скорость  $V_x = \sqrt{g R i}$  так же, как и ее местные значения  $c_x$  в отдельных точках периметра.

В начале, при малых уклонах, сопротивление стенок будет подчиняться закону гладкого сопротивления, с ламинарной пленкой по всему периметру. С ростом уклона в месте наибольшего касательного напряжения, т.е. в середине дна, появится доквадратичная область, распространяющаяся постепенно на остальную часть смоченного периметра. При больших уклонах большая часть периметра будет охвачена квадратичным сопротивлением. Но так как в углах касательное напряжение равняется нулю, то на каком-то протяжении гладкая и доквадратичная области будут всегда сохраняться.

Рассматривая сопротивление потока полигонального сечения в целом, квадратичная область сопротивления теоретически вообще невозможна. Практически же она может наблюдаться, так как доля периметра, охваченная гладкой и доквадратичной областями, может быть ничтожной по сравнению с его остальной частью.

Для одной и той же шероховатости пределы доквадратичной области зависят от формы сечения. Очевидно, что для полигональных сечений (прямоугольных, треугольных, трапециевидальных) эта область должна иметь более широкие пределы, чем для сечений с более равномерным распределением касательных напряжений (полуциркулярных, параболических). По всей вероятности кривые  $\lambda(Re)$ , полученные для одинаковых тех-

нических шероховатостей, но с разными формами сечения, имеют вид, изображенный схематически на фиг. 4. В доквadraticной области сопротивление полигонального сечения больше сопротивления полукруглого сечения. Этот факт был обнаружен уже Базеном [10], который на основе своих опытов пришел к заключению, что русло с криволинейным очертанием обладает на 10% большей пропускной способностью, чем русло полигональное.



Фиг. 4. Схематические зависимости  $\lambda(Re)$  для полигонального и полукруглого сечений

Все вышесказанное приводит к выводу, что формула Шези (I), вспомогательные формулы (2), (3) и (4), а также шкала коэффициентов шероховатости, полученная на основе натуральных и лабораторных измерений многих десятков лет, описывают в большинстве случаев доквadraticную область сопротивления.

Можно утверждать, что коэффициент  $n$ , отражающий в этих

формулах шероховатость, зависит от целого ряда других факторов. Для описания самой шероховатости требуется не менее двух коэффициентов. Кроме того, коэффициент шероховатости  $n$  зависит от уклона, вязкости, формы сечения и в какой-то мере от кинетичности потока ( $F_r$ ) и свободной поверхности. Эти же факторы отражаются в каком-то виде в величине показателя  $u$  формулы (2).

Формула Шези (I) и все существующие вспомогательные формулы для определения скоростного множителя  $C$  не учитывают влияния всех перечисленных факторов. По этой причине пользование формулой Шези не может обеспечить требуемую точность в гидравлических расчетах открытых русел, особенно в случае сравнительно гладких поверхностей.

Назрела надобность проведения обширных и систематических исследований по изучению сопротивления открытых русел. Учитывая трудоемкость опытов требуется тесное сотрудничество и координация работ научных учреждений, работающих в этом направлении.

#### Л и т е р а т у р а

1. О.М. Айвазян. Некоторые положения современной теории гидравлического сопротивления русел и их соответствие опытными данным. Доклады ТСХА, 1963, вып. 87.
2. А.П. Зегжда. Гидравлические потери на трение в каналах и трубопроводах, 1957.
3. В.Н. Козин. О сопротивлении безнапорному движению воды в трубах круглого сечения. "Известия Вузов, Строительство и Архитектура", 1963. № I.
4. Г.М. Ломизе. Фильтрация в трещиноватых щелях, 1951.
5. А.А. Маастик. Исследование сопротивления движению воды в открытых призматических руслах. Изд. Эст. сельхоз. акад., 1959.

6. А.А. Маастик. О сопротивлении движению воды в технически шероховатых руслах. Сб. научных тр. Эст. сельхоз. акад. 1961, № 22
7. Л.А. Тепакс. Граничные условия турбулентного потока при обтекании шероховатых стенок. Труды ТПИ, серия А, № 78, 1956.
8. Л.А. Тепакс. Гидравлическое сопротивление труб в доквadraticной области. Труды ТПИ, серия А, № 83, 1956.
9. Н.Ф. Федоров. Новые исследования и гидравлические расчеты канализационных сетей. 1964.
10. Bazin. Recherches expérimentales sur l'écoulement de l'eau dans les canaux découverts. Memoires présentes par divers savants a l' Académie des Sciences, 1865.
11. Chen Che-Pen. La différence des pertes de charge dans un écoulement en conduit circulaire, d'une part, et dans un écoulement en canal a ciel ouvert, a faible tirant d'eau, d'autre part. La Houille Blanche, nov.1959, Nr.6.
12. Dan-Cheng Woo, E.F.Brater. Laminar Flow in Rough Rectangular Channels. Journal of Geophysical Research, Dec. 1961, vol.66, nr.12.
13. R.W. Powell. Flow in a Channel of Definite Roughness. Proceedings ASCE, Dec. 1944, vol.70, Nr.10.
14. S.P.Raju. Versuche über den Strömungswiderstand gekrümmter offener Kanäle. Mitteilungen des Hydr. Inst. der Techn. Hochschule München, 1933, vol.6.
15. R.Smutek. Distribution of Shear Stress in a Rectangular Channel. Acta Technica, 1957, nr.3.

УДК 628.49

Р.Казалупскене, Б.Багинкас

НЕКОТОРЫЕ ДАННЫЕ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ И ПРОЕКТИРОВАНИЮ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗАВОДА Г. ШАУЛЯЙ ЛИТ. ССР  
ПО ПРОМЫШЛЕННОМУ ИЗГОТОВЛЕНИЮ ГУМАТОВ

В 1961 г. на основании постановления СМ Лит. ССР начаты работы по проектированию экспериментального завода в гор. Шауляй для промышленного изготовления гуматов на базе городских твердых и жидких отходов, включая канализационный ил из очистных сооружений, с добавлением торфа.

На заводе из местных отходов, имеющих большое количество органических веществ, будут изготавливаться органические удобрения-гуматы.

Так как аналогичных заводов в СССР пока нет, литературных данных и норм для проектирования таких заводов до сих пор тоже нет. Для разработки проекта в 1962-1964 гг. проводились исследования, которые состояли из определения качества и химического состава отходов, подбора состава смеси, наблюдения происходящих процессов во времени созревания гуматов.

Технология производства подобрана аналогично широко применяемой в Чехословакии и в других странах Европы, т.е. компостирование в штабелях. Но так как климатические условия в Литовской ССР иные чем в Чехословакии, мы провели

исследования с целью приспособления этого метода к нашим условиям. Проведенные исследования показали, что в наших условиях, изменив состав гумифицируемой смеси, целесообразно применять этот способ производства.

Важнейшим фактором созревания гуматов является температура. Процентный состав смеси подобран так, чтобы используя основную массу жидких и твердых отходов органического происхождения, во время созревания температура поднималась выше  $50^{\circ}\text{C}$ , т.е. выше летальной температуры для гельминтов и некоторых патогенных бактерий. За счет жизнедеятельности термофильных аэробных микроорганизмов, ведущих процесс разложения органических веществ, в течение первых семи суток температура гуматов достигает более  $50^{\circ}\text{C}$ .

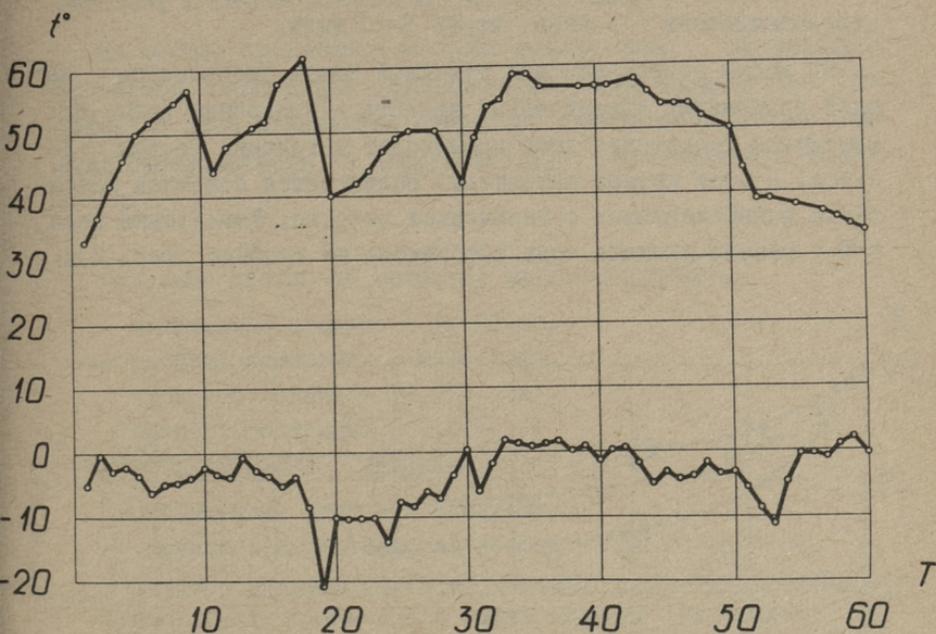
С целью определения зависимости между количеством органических веществ в смеси и температурой были заложены четыре серии опытных штабелей (одна серия состояла в среднем из 6-ти штабелей различных размеров и составов) в разные времена года.

I. В первой серии штабелей количество органических веществ было 9-10% от сухого вещества, во второй серии - 14-16%, в третьей - 16-18% и в четвертой - 18-21%.

Измерение температуры во всех исследуемых штабелях производилось в двух-трех горизонтах ежедневно, в 8 часов утра.

Получено, что изменение температурного режима в основном зависит от количества органических веществ в компосте. Во время приготовления компостов с 9-10% органического вещества температура  $30^{\circ}\text{C}$  была достигнута на 14-й день; с 14-16% - до  $39^{\circ}\text{C}$  на 5-й день и держалась 4 дня, после чего начала постепенно понижаться; с 16-18% - до  $40^{\circ}\text{C}$ ; с 18-21% до  $60-70^{\circ}\text{C}$ . Следует отметить, что при наружной температуре воздуха в зимнее время  $-20^{\circ}\text{C}$ , температура смеси с содержанием органических веществ 18-21% достигла вы-

ше 50°C (фиг. 1)



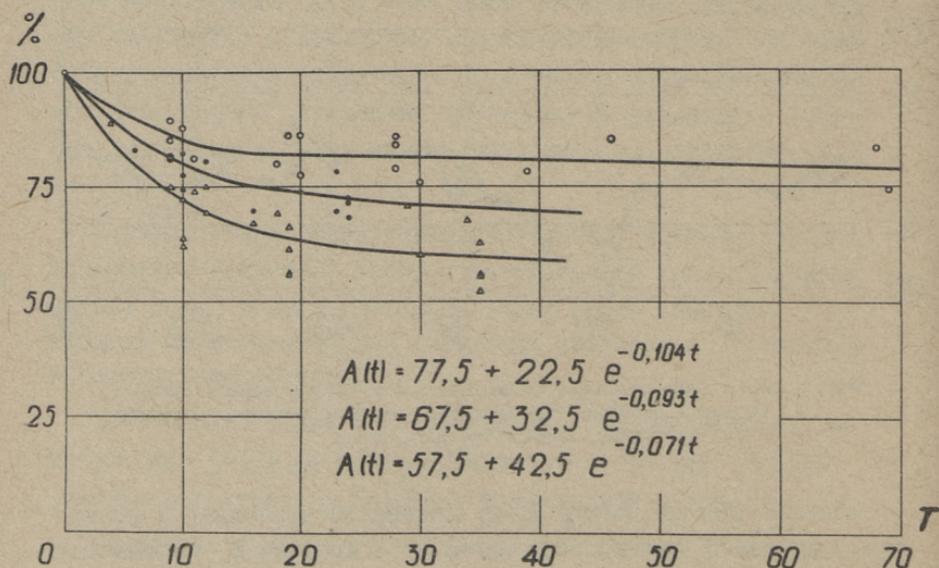
Фиг. 1. Изменение температурного режима в зимнее время. Нижняя кривая - наружная температура, верхняя кривая - температура компостируемой смеси

Опытные штабеля имели форму усеченной пирамиды, с размерами оснований 4 x 4 м и высотой от 1 до 3 м. В промышленном производстве можно применять штабеля (как это делается в Чехословакии) трапецидального поперечного сечения высотой 3-4 м, шириной 8-12 м и длиной 120-180 м. Для удобства эксплуатации смесь укладывается в штабеля секциями, длиной по 40-60 м каждая. Штабеля укладываются на специально оборудованных площадках.

Для ускорения биотермических процессов, а также для улучшения условий аэрации производится перелопачивание штабелей с одного ряда в другой грейферной лопатой. Следствием перелопачивания верхние слои массы перемещаемого штабеля

попадают во внутрь новообразуемого штабеля, чем обеспечиваются однородные биотермические условия. Достаточное число перелопачиваний - 3 раза, через 5-10 дней.

Во время созревания вес гуматной смеси уменьшается за счет разложения органических веществ и испарения воды. Интенсивное уменьшение веса происходит в течение первых 14 суток. В этот период интенсивно разлагается основная масса легко минерализуемых органических веществ. Уменьшение веса, в %, в разные времена года изображено на графике (фиг. 2).



Фиг. 2. Уменьшение гуматной смеси в разные времена года

После 35-40-суточного производственного процесса промышленный гумат является пригодным на опыт в качестве органического удобрения.

Под влиянием микроорганизмов и кальция, свежих гуминовых кислот, образовавшихся за период гумификации, смесь по-

степенно теряет липкость, приобретает сыпучую структуру, бурый цвет и запах садовой компостной земли.

На основе полученных опытных данных было разработано проектное задание для строительства ранее упомянутого завода. По мере накопления отбросов, производительность завода предусмотрена в первую очередь строительства 50000 т в год.

Основные данные по генплану завода следующие:

- занимаемая площадь - 38465 м<sup>2</sup>,
- площадь застройки - 2697,5 м<sup>2</sup>,
- кубатура зданий - 19,957 м<sup>3</sup>,
- процент застройки - 7,0 %,
- площадь полей гумификации - 7,200 м<sup>2</sup>.

Экономические данные - следующие:

- стоимость строительства завода - 758 тыс.рублей,
- годовые производственные расходы - 170 тыс.рублей,
- стоимость извлеченного утильсырья по закупочным ценам - 49 тыс.рублей,
- расходы на изготовление 50000 т гуматов - 120,5 тыс.рублей,
- себестоимость 1 т гуматов - 2,41 рубля.

Одна тонна гуматов увеличивает урожай зерновых культур в среднем на 1,5 центнера. В денежном выражении по последним закупочным ценам для зерновых культур это будет 19,5 рублей. Окупаемость капиталовложений - менее чем через год.

Валовый доход от повышения урожая зерновых состоит из 975 тыс.рублей.

Доходы от повышения урожая зерновых окупят строительную стоимость завода в течение одного года.



УДК 628.1

Ю.Э. Кальюмяэ

О ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОМ ОБОСНОВАНИИ ПРИ  
ПЛАНИРОВАНИИ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ВОДНЫХ РЕСУРСОВ МАЛОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО  
РАЙОНА

На современном этапе развития народного хозяйства необходима разработка схем комплексного использования водных ресурсов, предусматривающих наиболее рациональное распределение водных ресурсов между отдельными видами водопотребителей и водоиспользователей (между отдельными отраслями народного хозяйства) в условиях полного воспроизводства водных ресурсов.

В этих целях, как известно, и разрабатывается генеральная схема комплексного использования и охраны водных ресурсов как для Советского Союза в целом, так и для всех союзных республик и экономических районов.

Такая схема для Эстонской ССР почти уже закончена и в настоящее время проводятся лишь некоторые уточнения и дополнения ее отдельных положений.

В генеральной схеме комплексного использования и охраны водных ресурсов Эстонской ССР дается общая оценка поверхностных и подземных водных ресурсов, рассматриваются требования к ним со стороны различных отраслей народного хозяйства, мероприятия по их охране и на основе разработки

водохозяйственных балансов выявляются дефицитные по воде районы и промышленные узлы. Определяются также все необходимые инженерные мероприятия и требуемые капиталовложения для водообеспечения всех отраслей народного хозяйства республики.

Не останавливаясь на методических вопросах составления комплексной водохозяйственной схемы малого экономического района (как Эстонская ССР), хотя эти вопросы нами подробно изучались, приведем здесь лишь краткую водохозяйственную характеристику Эстонии, установленную вышеуказанной схемой.

Эстонская ССР в разрезе определенных народнохозяйственных районов и промышленных узлов совершенно по-разному обеспечена водными ресурсами. Если некоторые районы (Тартуский, Пярнуский) обеспечены на ближайшие 15-20 лет собственными водными ресурсами в условиях естественного стока, то для водоснабжения Таллинского и сланцевого народнохозяйственных районов потребуются особые водохозяйственные мероприятия: зарегулирование стока и переброска его от одного речного бассейна в другой. При этом Таллинский народнохозяйственный район, который является наиболее дефицитным по воде из всех районов республики, не удовлетворяется собственными водными ресурсами и требуется увеличение его водных ресурсов за счет других районов (Пярнуский, Тартуский).

Еще более в неравных условиях, с точки зрения их водоснабжения, являются некоторые промышленные узлы (Таллинский, Кохтла-Ярвеский, Кивиыльский) по сравнению с другими промышленными узлами (Тартуский, Нарваский, Ряпинаский), которые имеют местные, достаточно мощные водоисточники и водоприемники очищенных сточных вод.

Неравномерные условия водообеспечения отдельных районов и промышленных узлов республики безусловно отражаются и в соответствующих инженерных мероприятиях (а соответственно

и в затратах), требуемых для водоснабжения этих районов и промышленных узлов.

Возникает справедливый вопрос: как планировать комплексное использование водных ресурсов, чтобы получить наибольший экономический эффект в целом по народному хозяйству рассматриваемого района (республики) в какой-то определенный период?

Условия водообеспечения отдельных районов в общих чертах также уже указывают на целесообразность или нецелесообразность планирования увеличения водопотребления и водопользования в этих районах, и позволяют разрабатывать соответствующие рекомендации по развитию и размещению производительных сил республики.

Но такие рекомендации, хотя разработанные на основании общих водохозяйственных условий республики, имеют локальный характер и не разрешают проблему в целом. Остается открытым основной вопрос — является ли составленная (на основании общегосударственного плана развития народного хозяйства) комплексная водохозяйственная схема наиболее оптимальной или же имеются другие решения, где с некоторым изменением народнохозяйственного плана (по территории района), можно сэкономить общегосударственные затраты на развитие народного хозяйства при прочих равных условиях.

Для разрешения этой проблемы необходимо составить большое количество вариантных решений по использованию водных ресурсов — комплексных водохозяйственных схем — и с технико-экономическим сравнением указанных вариантных решений определить оптимальное решение.

В общем случае, когда рассматривается развитие всех отраслей водного хозяйства (водоснабжение, канализация, гидроэнергетика, рыбное хозяйство, водный транспорт, мелиорация, бальнеология) равно, определение оптимального решения комплексной водохозяйственной схемы является ис-

ключительно трудоемкой и в большей степени не разрешенной.

В таком случае, особенно при достаточно большой площади рассматриваемого района, практически невозможно выявить достоверных экономических критерий на определенный период (минимум 10–15 лет).

В первом приближении можно такую проблему решать при допущении известных упрощений, которые вытекают из природных и экономико-географических условий района.

Почти всегда в каждом районе одна или две отрасли водного хозяйства играют ведущую роль и определяют направление развития водного хозяйства, а тем самым и направление использования имеющихся в районе водных ресурсов.

Наличие в рассматриваемом районе ведущих отраслей водного хозяйства позволяет задачу оптимального планирования комплексного использования водных ресурсов разрешить, исходя из интересов ведущей отрасли водного хозяйства.

В условиях Эстонской ССР доминирующей отраслью водного хозяйства является водоснабжение и использование водоемов, как приемников очищенных сточных вод. Основные водопотребители — промышленность и городское население. Водопотребление сельского хозяйства сравнительно невелико; основное значение в мелиорации имеет осушение сельскохозяйственных земель. Категориями водопользования являются рыбное хозяйство и наряду с этим бальнеология. Гидроэнергетика и водный транспорт в республике мало развиты и предпосылок для заметного развития не имеют.

Кроме указанного, известным методическим упрощением для Эстонии является отсутствие на территории республики длинных транзитных рек, ввиду чего почти весь формирующийся на ее территории поверхностный сток может быть использован для собственных нужд, не затрагивая интересы других смежных экономических районов.

В условиях, когда в республике доминируют проблемы водоснабжения и водоотведения над другими отраслями водного хозяйства, можно по-своему поставить и разрешить задачу наиболее оптимального планирования комплексного использования водных ресурсов.

Основными экономическими критериями при определении оптимального варианта комплексной водохозяйственной схемы являются и здесь суммарные капиталовложения (с учетом их окупаемости) и эксплуатационные затраты, которые непосредственно определяются от заданной водоотдачи. Таким образом для каждого рассматриваемого варианта определяются так называемые приведенные затраты, которые пропорциональны заданной водоотдаче.

Суммарные приведенные затраты ( $\Theta$ ) равняются:

$$\Theta = \sum_{i=1}^n \Theta_i = \sum_{i=1}^n (S_i + pK_i),$$

где  $S_i$  - себестоимость годовой продукции в определенной точке (населенный пункт) рассматриваемого района,

$K$  - необходимые капиталовложения для водообеспечения определенного водопотребителя (населенного пункта) района,

$p$  - коэффициент эффективности капиталовложений

$$p = \frac{1}{T},$$

$T$  - нормативный срок окупаемости капиталовложений в годах.

Исходя из природных и экономико-географических условий рассматриваемого экономического района для определения суммарных приведенных затрат ( $\Theta$ ) следует выбирать оптимальное  $N$ -е количество населенных пунктов (городов и промузлов), где в соответствии с планом развития народного хозяйства намечается наибольший рост производительных сил. Количество рассматриваемых населенных пунктов, с одной стороны, должно с достаточной глубиной охватывать

наиболее характерные водохозяйственные условия района, но в то же время для уменьшения объема расчетов быть минимальным.

Учитывая природные и экономико-географические условия Эстонии, количество рассматриваемых населенных пунктов следует выбирать около сорока.

С учетом потребности в воде отдельных населенных пунктов республики, определенной на основании плана развития народного хозяйства и условий водообеспечения данных районов и промузлов, определяются суммарные приведенные затраты для одного варианта комплексной водохозяйственной схемы.

Под условиями водообеспечения следует подразумевать как условия водоснабжения, так и условия канализации (мощность водоприемника очищенных сточных вод) рассматриваемого населенного пункта. Кроме того, условия водообеспечения в каждом случае установлены с обязательным соблюдением требований комплексности использования водных ресурсов, т.е. с учетом интересов других отраслей водного хозяйства (в основном рыбное хозяйство и бальнеология).

Условно можно считать, что первым вариантным решением является такое решение, в котором план развития и размещения производительных сил составлен без учета водного фактора. В таком случае следует ожидать, что величина приведенных затрат (для водного хозяйства) получается наибольшей.

Все последующие варианты составляются с учетом водного фактора, путем перераспределения прироста суммарного водопотребления между отдельными районами и промузлами республики, с намечением соответствующих изменений и в народнохозяйственном плане (в основном в территориальном разрезе). В первую очередь рекомендуемые изменения должны быть такими, которых легко осуществить и обосновать, (например новые производства, базирующиеся на привозном сырье и т.п.).

Следует теперь установить, какую часть из заданной водоотдачи можно перераспределить с учетом водохозяйственных условий рассматриваемого экономического района.

Заданной водоотдачей  $\Sigma Q$ , о чем говорилось выше, условно принято суммарное водопотребление экономического района, определенное на основании плана развития народного хозяйства на определенный период (20 лет). Условным оно является потому, что в расчетах учитываются и условия водоотведения (канализации), которые в ряде конкретных случаев могут быть лимитирующими и увеличивающими таким образом суммарную водоотдачу  $\Sigma Q$ .

Перераспределить, с составлением определенного количества вариантов решений из суммарного водопотребления  $\Sigma Q$  можно лишь какую-то часть  $\Delta Q_g$ , которая определяется следующим образом:

$$\Delta Q_g = \Sigma Q - (\Sigma Q_c + \Delta Q_e),$$

- где  $\Delta Q_g$  - перераспределяемое количество воды (с изменением народнохозяйственного плана) в рассматриваемом экономическом районе в определенном количестве, - динамический прирост водопотребления за расчетный период (20 лет),
- $\Sigma Q$  - суммарная водоотдача, т.е. суммарное водопотребление рассматриваемого района под конец расчетного периода,
- $\Sigma Q_c$  - суммарное водопотребление рассматриваемого района в начале расчетного периода, т.е. практически современный уровень водопотребления района,
- $\Delta Q_e$  - естественный прирост водопотребления в населенных пунктах рассматриваемого района за расчетный период.

Определяемый таким путем динамический прирост водопотребления за расчетный период для эстонского экономиче-

ского района составляет около 220 млн. м<sup>3</sup> воды в год или около 30% от суммарного подопотребления.

Перераспределяя динамический прирост  $\Delta Q_D$  между оптимальным количеством "Н" населенных пунктов с учетом водохозяйственных условий рассматриваемого экономического района "М" количество раз, можно составить определенное количество вариантных решений и технико-экономическим сравнением указанных вариантных решений определить оптимальное решение комплексного использования водных ресурсов данного экономического района. В таком решении народное хозяйство обеспечивается водой минимальными суммарными затратами на водное хозяйство при полном воспроизводстве водных ресурсов. При этом интересы отдельных отраслей водного хозяйства должны быть минимально противоречивыми относительно интересов основных отраслей.

Учитывая большое количество вариантных решений и множество факторов, влияющих на технико-экономическое сравнение указанных вариантов, для разрешения такой задачи требуется применение методов линейного программирования с использованием электронных вычислительных машин.

В качестве исходного материала помимо основного (первый вариант генеральной схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов Эстонской ССР) потребуются дополнительно технико-экономические показатели водообеспечения рассматриваемых населенных пунктов (для Эстонии их сорок). Для получения более гибкой системы таких показателей следует для каждого населенного пункта установить оптимальный предел прироста водопотребления, исходя из его водохозяйственных условий (от наличия водных ресурсов, с составлением необходимого количества водохозяйственных балансов). В систему таких показателей включаются: себестоимости воды  $S_i^6$  и капиталовложения  $K_i^6$  для водопотреблений  $Q_i^6$ , и аналогичные показатели для водоотведе-

ния  $S_i^k, k_i^k, Q_i^k$  .

Таким образом для каждого населенного пункта можно определить приведенные затраты в зависимости от водоотдачи данного населенного пункта  $Q_i$  :

$$Z_i = \sum_{i=1}^m (S_i^b + S_i^k + p k_i^b + p k_i^k) .$$

Имея систему таких показателей, очень легко составить такие вариантыные решения комплексных водохозяйственных схем, когда суммарная водоотдача  $\sum Q$  не является постоянной для "m" количества вариантов, а изменяется либо изменением структуры промышленности или объема производства, либо изменением расчетного срока развития народного хозяйства рассматриваемого экономического района. Именно такие вариантыные решения являются более типичными и более важными для определения оптимального решения комплексного использования и охраны водных ресурсов данного экономического района. В итоге мы устанавливаем оптимальные динамические приросты водопотребления (водоотдачи) не только для экономического района в целом, а и для каждого населенного пункта в отдельности.

В конечном счете мы получаем водохозяйственно-экономический макет данного экономического района (Эстонии), который может быть использован при гибком планировании развития народного хозяйства района на расчетный период.

Предварительные результаты, полученные при сравнении ограниченного количества вариантовных решений в разрезе отдельных районов Эстонии, показывают, что разница в суммарных капиталовложениях в отдельных вариантах планирования является почти трехкратной. При сравнении в разрезе более узких концентров (населенных пунктов) разница между определенными вариантами получается еще более значительной.

Учитывая, что для развития водного хозяйства республики

(в основном водоснабжения и канализации) потребуется примерно 216 млн.рублей, то с установлением оптимального варианта планирования комплексного использования водных ресурсов можно сэкономить миллионы рублей.

УДК 628.163.001.5

Х.Я. Лонд. Л.А. Тепакс

ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ПРОЦЕССА МИКРОФИЛЬТРАЦИИ  
И ВЛИЯНИЕ МИКРОФИЛЬТРОВ НА ТЕХНОЛОГИЮ  
ОЧИСТКИ ПИТЬЕВЫХ ВОД

Применение микрофильтров для предварительной обработки воды дает возможность улучшать последующую технологию очистки воды [1 - 3], уменьшать расход воды на промывку скорых фильтров и экономить реагенты.

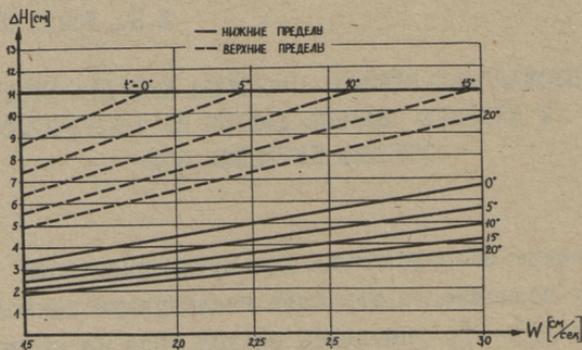
В статье [4] приведены результаты анализа экспериментальных исследований, проведенных на Таллинской водоочистой станции микрофильтром МФ-2. Установленные закономерности процесса микрофильтрации через органическую пленку подтверждают, что в определенных пределах потери напора ( $\Delta H$ ) на микросетке можно достичь максимального эффекта очистки воды от планктона ( $E_N$ ) и взвешенных веществ ( $E_M$ ).

При этом основными показателями, характеризующими закономерности, являются гидравлическая величина  $\frac{\Delta H}{WQ}$  и нагрузка микросетки MWT ( $W$  - скорость фильтрации,  $Q$  - кинематическая вязкость,  $M$  - количество взвеси в исходной воде,  $T$  - продолжительность фильтроцикла).

Полученные результаты [4] позволяют установить параметры, определяющие оптимальные режимы микрофильтрации.

На фиг. 1 показаны нижние и верхние (допустимые) преде-

лы потери напора  $\Delta H$  в зависимости от температуры ( $t^\circ$ ) исходной воды. Например, при скоростях фильтрации  $W = 2,25 - 2,5$  см/сек, что отвечает производительности микрофилтра МФ-2,  $Q = 90 - 100$  м<sup>3</sup>/час,  $\Delta H = 5 - 8$  см для любых температур воды. На графике показан также установленный экспериментом предел  $\Delta H = 11$  см, гарантирующий стабильность пленки при фильтрации.



Фиг. 1. Оптимальные пределы перепада давления на микросетке в зависимости от скорости фильтрации при разных температурах воды.  
 \_\_\_\_\_ нижние пределы, - - - - - верхние пределы

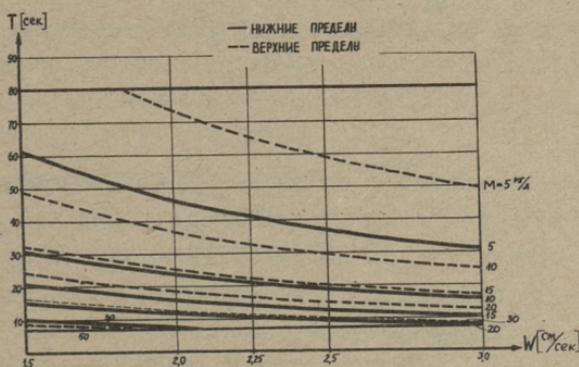
Составленный график (фиг. I) может быть использован для микрофилтров любых размеров при условии, что используется микросетка 004, и что исходная вода по всем физико-гидробиологическим показателям отвечает свойствам воды озера Юлемисте.

Автоматизация работы микрофилтров должна быть основана на условии сохранения перепада давления  $\Delta H$  в требуемых пределах, т.е. в условиях Таллинской водоочистной станции на основе графика фиг. I.

При сильно развитом фитопланктоне, обуславливающим быстрое образование пленки, требуется её полный отмыв (в Тал-

линских условиях численность фитопланктона доходит до 200 000 клеток в мл при  $M = 50$  мг/л). Регулирование работы микрофильтров следует осуществлять путем изменения продолжительности фильтроцикла  $T$ , т.е. числа оборотов барабана микрофильтра.

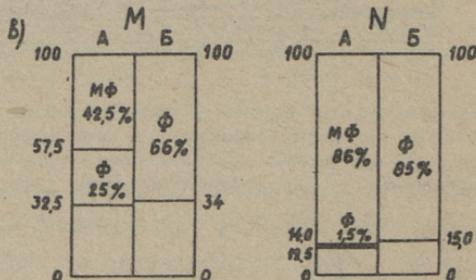
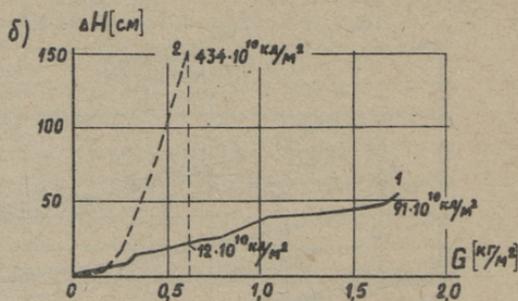
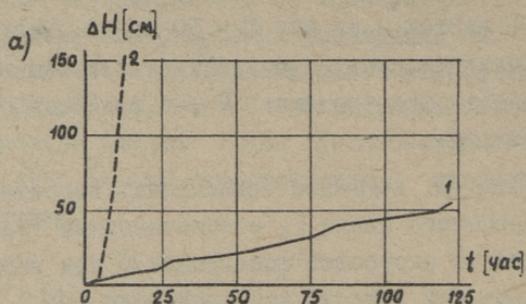
На фиг. 2 показана зависимость вероятной продолжительности рабочего цикла  $T$ , обеспечивающей требуемые перепады давления от скоростей фильтрации  $W$  при разных концентрациях взвешенных веществ исходной воды ( $M$ ).



Фиг. 2. Вероятная продолжительность рабочего цикла, обеспечивающая требуемые перепады давления в зависимости от скорости фильтрации при разных концентрациях взвешенных веществ исходной воды. \_\_\_\_\_ нижние пределы, - - - - - верхние пределы

Исходная вода Таллинской водоочистной станции содержит большое количество мелкодисперсных частиц. Как показывают результаты опытов, эти частицы задерживаются в микрофильтре лишь частично. Прозрачность микрофильтрованной воды невелика и количество взвешенных веществ в большинстве случаев превышает норму. Следовательно, после микрофильтрации необходима последующая очистка воды.

Для изучения влияния микрофильтрации на работу скорых



Фиг. 3. Рост потери напора и эффект задержания взвеси в скором фильтре при скорости фильтрации 6 м/час. а - рост потери напора в зависимости от времени, 1 - с применением микрофильтрации, 2 - без микрофильтрации  
 б - рост потери напора в зависимости от количества взвеси задержанной в скором фильтре,  
 в - эффект задержания взвеси. М - по весу взвеси, N - по количеству клеток фитопланктона, А - с применением микрофильтрации, Б - без микрофильтрации

фильтров было проведено множество опытов с некоагулированной и коагулированной водой. Во всех опытах поддерживался постоянный расход воды  $Q = 80 \text{ м}^3/\text{час}$  через микрофильтр, что соответствовало средней расчетной скорости фильтрации через погруженную в воду микросетку  $22,20 \text{ л/сек. м}^2, \Delta H = 6 \text{ см}$ .

Микрофильтрованная вода направлялась на опытный скорый песчаный фильтр площадью  $0,45 \text{ м}^2$ , с двухслойной загрузкой: 55 см песка ( $d_{\text{экв}} = 0,84$ , коэффициент неоднородности  $k = 1,84$ ) и 55 см активированного угля.

Работа двухслойного фильтра оценивалась по показателям потери напора на фильтре, продолжительности фильтроциклов, эффекту задержания взвешенных веществ и планктона, а также по прозрачности и цветности воды.

Восемь серий опытов проводились с некоагулированной водой. На фиг. 3а показан рост потери напора двух серий в скором фильтре при скорости фильтрации  $V = 6 \text{ м/час}$ . Потеря напора в фильтре при использовании микрофильтра растет в среднем со скоростью 4–5 мм/час, а без микрофильтра – 12–18 см/час, т.е. в 30–40 раз быстрее.

Можно предполагать, что уменьшение потери напора в фильтре происходит в первую очередь за счет задержанной взвеси в микрофильтре.

В целях выяснения этого вопроса для тех же серий были подсчитаны количества взвеси, задержанной в загрузке фильтра ( $G - \text{кг/м}^2$ ), т.е. весовые нагрузки, характеризующие процесс фильтрации.

Выбранные для сравнения две серии (фиг. 3) имели приблизительно одинаковые показатели: численность фитопланктона с применением микрофильтра в исходной воде 71600 клеток/мл, без микрофильтра – 71200 клеток/мл,  $M = 12,9$  и  $10,2 \text{ мг/л}$ ,  $t^\circ = 5,7^\circ$  и  $5,3^\circ$ ,  $V = 6 \text{ м/час}$  в обеих сериях. На фиг. 3 б показан прирост потерь напора в зависимости от количества задержанного вещества.

Как видно, при равных весовых нагрузках процессы фильтрации сильно отличаются друг от друга. При микрофильтрованной воде рост потери напора составляет в среднем  $31 \text{ см/кг/м}^2$ , без микрофильтра —  $244 \text{ см/кг/м}^2$ , т.е. в 8 раз больше. Это объясняется тем, что без применения микрофильтра к концу работы в загрузке скорого фильтра было задержано фитопланктона  $434 \cdot 10^{10}$  клеток/м<sup>2</sup> (за 12 часов), с использованием же микрофильтра — только  $91 \cdot 10^{10}$  клеток/м<sup>2</sup> (за 122 часа).

Следовательно, весовое количество взвешенных веществ не характеризует в достаточной мере процесс фильтрации; первостепенное значение имеет качество взвеси.

Из анализа баланса взвеси и численности фитопланктона выяснилось, что после скорого фильтра вода в обеих сериях имела почти одинаковое качество (фиг. 3 в). Однако при использовании микрофильтра в скором фильтре задерживается 25% взвешенных веществ и 1,5% планктона, а без микрофильтра соответственно 66% и 85% от их исходного количества.

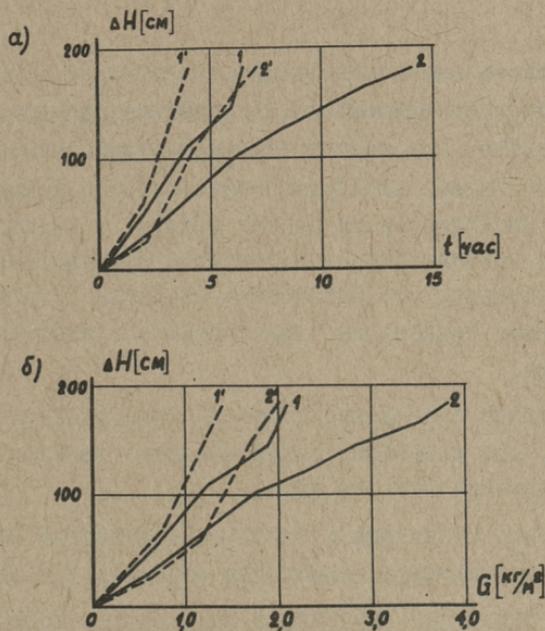
Следовательно, микрофильтр выделяет именно те частицы, которые быстро засоряют песчаные фильтры. Оставшиеся в воде клетки очень мелкие и не прикрепляются к частицам загрузки. Можно заключить, что число клеток также не отражает количества и качества взвеси. Поэтому объемный эффект очистки воды, достигнутый микрофильтрацией, значительно больше, чем это выражается уменьшением весового количества взвеси или числа клеток.

Проведенными опытами доказано, что при наличии в исходной воде большого количества мелкодисперсной взвеси необходимо применять коагуляцию.

С целью выяснения возможности использования на Таллинской водоочистной станции одноступенчатой схемы очистки воды было проведено 19 серий опытов, из них 12 серий с микрофильтром и 7 без микрофильтра.

Доза  $Al_2O_3$  была в пределах от 10 до 20 мг/л и скорость фильтрации  $v = 4, 6, 8$  м/час.

Опыты проводились разными загрузками скорого фильтра. Кроме вышеописанной двухслойной загрузки изучалась однослойная загрузка песка в 75 см (тот же состав песка), а также двухслойная загрузка (75 см песка + 35 см активированного угля).



Фиг. 4. Рост потери в скором фильтре с применением коагуляции при скорости фильтрации 6 м/час.

а - рост потери напора в зависимости от времени, 1 - при дозе коагулянта 12 мг/л ( $Al_2O_3$ ), 2 - при дозе 10 мг/л,

1' и 2' - то же, без микрофильтрации,

б - рост потери напора в зависимости от количества взвеси задержанной в скором фильтре

Наилучшие результаты были получены в последнем случае (фиг. 4). При дозе коагулянта 10-20 мг/л все показатели очищенной воды находились в пределах нормы. Следует отметить, что в

то же время на водоочистной станции, работающей по двухступенчатой схеме очистки, применялась доза коагулянта 20 мг/л.

В процессе коагуляции в воде образуется дополнительное количество взвеси, которое в несколько раз превышает количества, задержанные микрофильтром. Может показаться, что в этих условиях эффект микрофльтрации незначителен, однако опыты подтвердили обратное: как следует из фиг. 4 а, микрофльтрация значительно увеличивает продолжительность фильтроцикла.

Определить количество взвеси, задержанной в загрузке фильтра, практически невозможно, так как коагуляция происходит в самом фильтре. Однако это количество можно определить теоретическим путем, пользуясь общеизвестной формулой [5]. На фиг. 4 б изображен рост потери напора в скором двухслойном фильтре в зависимости от количества задержанного вещества. Можно заключить, что физические свойства коагулированной взвеси также существенно изменяются с применением микрофльтрации.

Результаты проведенных экспериментальных исследований показывают, что микрофльтрация является эффективным методом предварительной очистки воды.

Выделение планктона и частично взвешенных веществ улучшает всю последующую технологию водоочистной станции.

В благоприятных случаях, с применением подходящей фильтрующей загрузки в скором фильтре, вполне возможно использовать одноступенчатую схему очистки воды.

#### Л и т е р а т у р а

1. В.Ф. Соколов, О.А. Халезова, М.И. Прахова. Микрофльтрация воды. " Водоснабжение и санитарная техника", №10, 1962.

2. В.Ф. Соколов, М.И. Прахова и др. Опыты применения микрофилтрации и озонирования для очистки цветных мутных вод, содержащих планктон. "Водоснабжение и канализация", вып. 3, серия IV. Новая техника жил.-ком. хозяйства. Мин.ком.хоз. РСФСР. М., 1964.
3. В.Ф. Соколов, М.И. Прахова. Исследования по микрофилтрации воды на полупроизводственной установке. Водоснабжение, № 4. Научные труды, вып. XXX ОНТИ АКХ. М.-Л., 1961.
4. Х.Я. Лонд, Л.А. Тепакс. Предварительные результаты исследования микрофилтрации на Таллинской водоочистной станции. См. наст.сборник стр. 13.
5. СНиП II-Г 3-62.



УДК 628.394:551.465(261.38)

Л.Л. Пааль, А.М. Айтсам, В.К. Асток

О МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ СКОРОСТЕЙ  
И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ТЕЧЕНИЙ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ  
РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВЕЩЕСТВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ  
В МОРСКИХ ЗАЛИВАХ

Скорости течения в морях рассматриваются в океанологии обычно как неслучайные величины, функционально зависящие от нескольких аргументов. Однако при отсутствии явно выраженных периодически действующих внешних воздействий на равновесие морских вод, скорость течения образуется под влиянием множества одновременно действующих случайных событий. Следовательно, с математической точки зрения более правильно рассматривать скорости течения в морях как систему случайных величин или как случайные функции.

Настоящей статьёй начинается опубликование результатов ряда научных работ, выполненных в НИ лаборатории санитарной техники Таллинского политехнического института по исследованию скоростей морских течений как системы случайных величин, в интересах изучения стохастического процесса диффузии неконсервативных веществ в морях.

В настоящее время многие реки и водоемы, а также морские заливы в прибрежной зоне загрязнены. Причиной загрязнения водоемов является либо недостаточная степень очистки сточных вод в очистных сооружениях, либо нерацио-

нальное использование самоочищающей способности водоемов.

При спуске сточных вод в морские заливы применяются выпуски берегового и глубоководного типа. Канализационные выпуски берегового типа, особенно при спуске сточных вод в закрытую бухту, с санитарной точки зрения совершенно неприемлемы, так как не обеспечивают надлежащего смешения стоков с морской водой. Спуск сточных вод в морские бухты береговыми выпусками требует почти всегда полной биологической очистки сточных вод, так как в случае этих выпусков огромная самоочищающая способность моря остается неиспользованной. При сбросе сточных вод через глубоководный выпуск на больших расстояниях от берега сточная вода под влиянием ветров и течений хорошо смешивается с морской водой, вследствие чего концентрация веществ загрязнения резко уменьшается. Следовательно, при сбросе сточных вод в морские заливы через глубоководные выпуски требуется лишь неполная их очистка в очистных сооружениях.

Горизонтальное распространение пятна загрязнения сточных вод в море происходит под влиянием турбулентных морских течений. Таким образом процесс самоочищения морских заливов математически можно описать при помощи уравнения турбулентной диффузии /1/:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + v \frac{\partial s}{\partial x} + u \frac{\partial s}{\partial y} + w \frac{\partial s}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial s}{\partial z} \right) - k_1 s, \quad (1)$$

- где  $s$  — объемная концентрация веществ загрязнения,  
 $x, y, z$  — декартовы координаты,  
 $v, u, w$  — проекции осредненной по времени скорости на координатные оси,  
 $k_x, k_y, k_z$  — коэффициенты диффузии по направлению координатных осей,  
 $k_1$  — коэффициент неконсервативности веществ загрязнения.

Проекции осредненной по времени скорости течения  $v$ ,  $u$ ,  $w$ , входящие в уравнение (I), являются функциями от координат рассматриваемой точки моря  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , времени  $t$ , метеорологических условий  $m$  и гидрологических условий  $n$ , т.е.

$$v, u, w = f(t, x, y, z, m, n). \quad (2)$$

В закрытых морях и заливах (Балтийское море и др.) одной из многих причин возникновения течения является колебание уровня воды. По данным Н.А. Лабзовского [2], подъем уровня моря подразделяется на 1) подъемы уровня, вызываемые длинной барической волной, 2) ветровые подъемы и 3) сейшевые колебания уровня. Как показывает опыт, все вышеуказанные виды колебания уровня воды наблюдаются довольно часто и поэтому каждый подъем определяется как сумма отдельных подъемов. Таким образом, скорость течения, а также другие его характеристики (направление, продолжительность) являются следствием большого числа складывающихся воздействий случайных событий. Следовательно, скорость течения можно рассматривать как случайную величину, подчиненную закону больших чисел.

Как известно из теории вероятности и математической статистики, случайные величины не определяются однозначно, а характеризуются законами распределения, устанавливающими связь между возможными значениями случайных величин и соответствующими вероятностями.

В общем случае осредненная по времени скорость течения является нестационарным вектором в трехмерном пространстве. Если предполагать, что изменение вектора скорости течения подчиняется закону больших чисел, то скорость течения можно рассматривать как систему, состоящую из четырех случайных величин, т.е. систему из трех координат и времени.

При отсутствии явно выраженных периодических воздействий на движение морских вод можно отказаться от нестационарности скорости течения и представить ее, как систему из ста-

ционарных случайных величин в виде трех координат. В инженерных расчетах распространения пятна загрязнения в морских заливах зачастую можно в первом приближении отказаться также от вертикальной составляющей скорости течения. В этом случае, на основе вышеприведенного, скорость течения можно рассматривать в виде плоской задачи, где скорость течения представляет собой систему из двух случайных величин — координат. В качестве таких величин можно принимать либо проекции вектора скорости на координатные оси в декартовой системе координат  $v$  и  $u$ , либо полярные координаты: радиус-вектор скорости  $v$  и полярный угол  $\varphi$ . В данной статье, для большей наглядности результатов, применяется полярная система координат.

Функция распределения системы двух случайных величин  $v$  и  $\varphi$  определяется зависимостью

$$F(v, \varphi) = P(V \geq v, \Phi \geq \varphi) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(v, \varphi) dv d\varphi, \quad (3)$$

где  $V, \Phi$  — случайные значения радиус-вектора и полярного угла,

$v, \varphi$  — неслучайные, заданные значения радиус-вектора и полярного угла,

$P(v, \varphi)$  — интегральная вероятность системы двух случайных величин,

---

\* Следует иметь в виду, что в общем случае радиус-вектор скорости и его полярные углы, имеющие место через короткие интервалы времени, не являются следствием независимых случайных событий. Следовательно, при строгом рассуждении, скорость течения в плоской задаче является системой не двух, а трех случайных величин. При этом под добавочной случайной величиной подразумевается скорость, предшествующие данному значению скорости течения, от которых зависит рассматриваемая скорость. Вопрос взаимозависимости скоростей составляет специальное исследование, результаты которого будут опубликованы в виде отдельной статьи.

При изложении результатов настоящей статьи предполагалось в первом приближении, что все скорости течения являются результатами независимых случайных событий.

$F(v, \varphi)$  — функция распределения системы двух величин,

$f(v, \varphi)$  — плотность распределения системы двух величин.

Плотность распределения системы двух зависимых случайных величин определима, если известны плотность распределения одной величины и условные плотности другой величины, т.е.

$$f(v, \varphi) = f(\varphi) \cdot f(v|\varphi) \quad (4)$$

или

$$f(v, \varphi) = f(v) \cdot f(\varphi|v), \quad (5)$$

где  $f(\varphi)$  и  $f(v)$  — плотности распределения отдельных случайных величин,

$f(v|\varphi)$  и  $f(\varphi|v)$  — условные плотности радиус-вектора и полярного угла.

Плотность распределения отдельных случайных величин, входящих в формулы (4) и (5), определяется зависимостями

$$f(v) = \int_0^{\Phi} f(v, \varphi) d\varphi$$

и

$$f(\varphi) = \int_0^v f(v, \varphi) dv.$$

При большом количестве данных наблюдений над скоростями течений весь собранный материал следует разделить на интервалы по обеим случайным величинам, и лишь затем определить закономерности распределения по преобразованным формулам (5) и (4). При этом плотность распределения системы  $v$  и  $\varphi$  определяется по формулам:

$$p(v_i \leq V < v_i + \Delta v, \varphi_j \leq \Phi < \varphi_j + \Delta \varphi) = p(v_i \leq V < v_i + \Delta v) \times \\ \times p(\varphi_j \leq \Phi < \varphi_j + \Delta \varphi | v_i \leq V < v_i + \Delta v) \quad (6)$$

или

$$p(v_i \leq V < v_i + \Delta v, \varphi_j \leq \Phi < \varphi_j + \Delta \varphi) = p(\varphi_j \leq \Phi < \varphi_j + \Delta \varphi) \times \\ \times p(v_i \leq V < v_i + \Delta v | \varphi_i \leq \Phi < \varphi_i + \Delta \varphi), \quad (7)$$

где  $p(v_i \leq V < v_i + \Delta v, \varphi_j \leq \Phi < \varphi_j + \Delta \varphi)$  - вероятность системы,  
 $p(v_i \leq V < v_i + \Delta v)$  - вероятность одной величины системы,  
 $p(\varphi_j \leq \Phi < \varphi_j + \Delta \varphi) | v_i \leq V < v_i + \Delta v$  - условная вероятность другой величины системы.

Функция распределения в этом случае определяется как

$$p(V \geq v, \Phi \geq \varphi) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p(v_i \leq V < v_i + \Delta v, \varphi_j \leq \Phi < \varphi_j + \Delta \varphi). \quad (8)$$

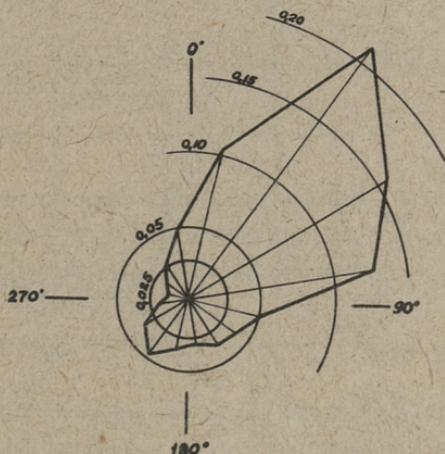
В инженерной практике зачастую требуется определить пространство пятна загрязнения не по всем направлениям, а лишь в одном, наиболее неблагоприятном секторе. В этом случае вместо общей функции распределения скоростей можно пользоваться соответствующей условной функцией в секторе  $\varphi_1 < \Phi < \varphi_2$ . Для определения условной функции распределения скоростей течения в уравнении (8) следует произвести суммирование не от 1 до  $n$ , а по тем значениям  $j$ , в которых данный сектор размещается между углами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ .

Аналогичным образом следует определить функции распределения для множества точек моря в направлении наиболее неблагоприятного распространения пятна загрязнения.

Для более полной характеристики распределения скоростей течения в морских заливах следует также определить типы и уравнения теоретических кривых распределения.

Для иллюстрации приведенной методики определения функций распределения скоростей течения приводим функции распределения, полученные обработкой данных скоростей течения, измеренных самопишущим прибором БПВ-2р на одной из станций в Таллинском заливе. При этом регистрация скорости и направления течения прибором производилась через каждые 30 ми-

нут. <sup>‡</sup> Диаграмма повторяемости направления течения, при разбивке всего горизонта на 16 секторов, приведена на фиг. 1.



Фиг. 1. Диаграмма повторяемости направления течения

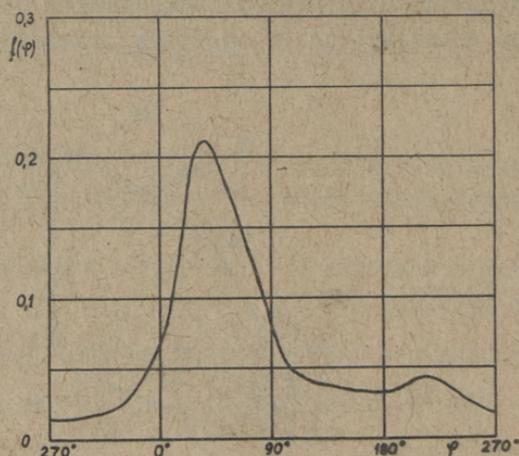
На фиг. 2 приведена статическая кривая плотности распределения направления течения  $f(\Psi)$ , причем при составлении кривой за начало направления полярного угла принято  $270^\circ$ , считая от северного направления.

Статистическая кривая, приведенная на фиг. 2, в отличие от обыкновенных кривых распределения, имеющих место в практике математической статистики, имеет два максимума.

Кривая распределения плотности направления течения (фиг. 2) характеризуется следующими численными характеристиками математической статистики:

среднее квадратическое отклонение  $\sigma = 1,299$ ,  
 коэффициент асимметрии  $\gamma_3 = 0,741$ ,  
 эксцесс  $\gamma_4 = 3,100$ .

<sup>‡</sup> Первичная обработка исходного материала выполнена в Управлении гидрометслужбы Эстонской ССР под руководством В.А. Будановой.



Фиг. 2. Статистическая кривая распределения направления течения

Физической причиной такого распределения с двумя максимумами является, по-видимому, влияние конфигурации берегов на направление течений.

Можно полагать, что аналитическая форма кривой распределения плотности направления течения может быть определена в виде ряда Фурье, причем точность ее сходимости с статистической кривой зависит от точности определения коэффициентов Фурье.

При определении функции распределения скоростей течения мы исходили из зависимости (8), т.е. рассматривали скорости в определенном секторе  $\varphi_1 \leq \Phi < \varphi_2$ . В данном случае при выводе функции распределения скорости течения величина сектора принята равной  $\varphi_1 - \varphi_2 = 22,5^\circ$ .

Проведенный анализ показал, что статистическое распределение плотностей скорости течения приближается к распределению Пирсона. Как известно, тип кривой Пирсона определяется при помощи критерия [3]

$$\chi = -\frac{r_3^2 (s+2)^2}{16(s+1)}, \quad (9)$$

где

$$S = \frac{6(r_4 - r_3^2 - 4)}{3r_3^2 - 2r_4 + 6}. \quad (10)$$

$r_3$  и  $r_4$  - соответственно коэффициенты асимметрии и эксцесса, определенные как отношения центрального момента соответствующего порядка  $\mu_k$  к среднему квадратичному отклонению в степени, равной порядку

$$r_3 = \frac{\mu_3}{\sigma^3} \quad \text{и} \quad r_4 = \frac{\mu_4}{\sigma^4}.$$

Для кривой распределения скоростей течения в секторе от  $0^\circ$  до  $22,5^\circ$  получено  $\chi = -0,450$ , чему соответствует кривая распределения Пирсона типа I. Уравнение кривой типа I в случае нашего примера имеет вид:

$$f(v) = 0,0865 \left(1 - \frac{v}{2,0}\right)^{0,24} \left(1 - \frac{v}{3,2}\right)^{3,24}, \quad (11)$$

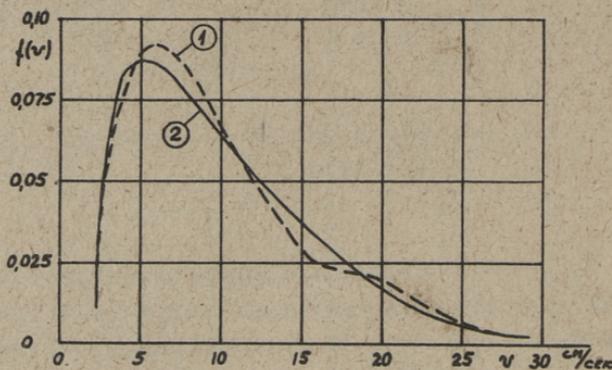
где  $v = V - \hat{V}$ , причем  $\hat{V} = 5,15$  и определяется формулой

$$\hat{V} = \bar{V} - \frac{6r_3}{2} \frac{s+2}{s-2}. \quad (12)$$

В формуле (12)  $\bar{V}$  - средняя скорость течения, которая в данном примере равна  $\bar{V} = 10,5$  см/сек.

На фиг. 3 приведены статистическая кривая плотности распределения скорости для сектора полярных углов от  $0^\circ$  до  $22,5^\circ$  и кривая распределения Пирсона типа I.

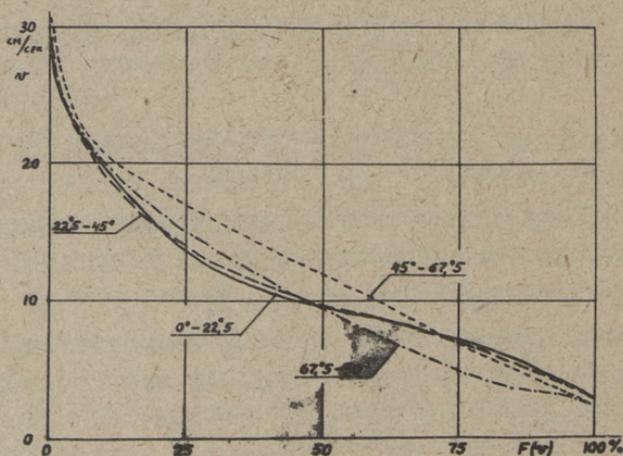
Для оценки степени согласованности теоретического распределения по типу I Пирсона и статистического распределения скоростей течения использовали критерий Пирсона  $P(\chi^2)$ . В результате расчетов получено  $P(\chi^2) > 0,95$ . Таким образом, вероятность случайного совокупного расхождения между наблюдаемыми и выравнивающими плотностями близка к единице.



Фиг. 3. Плотность распределения скоростей течения в секторе  $0^{\circ} - 22,5^{\circ}$   
 1—статистическая кривая, 2—кривая Пирсона типа 1

Следовательно, можно считать, что полученные расхождения являются случайными, происходящими в результате случайных колебаний, имеющих место в частных совокупностях.

Кривые условного распределения скоростей течения для секторов полярного угла  $0^{\circ}-22,5^{\circ}$ ,  $22,5^{\circ}-45^{\circ}$ ,  $45^{\circ}-67,5^{\circ}$  и  $67,5^{\circ}-90^{\circ}$  приведены на фиг. 4.



Фиг. 4. Кривые функции распределения скоростей течения

Для определения распространения пятна загрязнения течениями, кроме скорости и направления течения, необходимо также знать продолжительность скоростей течения. Функция распределения продолжительности течения определяется по аналогии с формулой (3) в виде

$$F(v, t) = P(V \geq v, T \geq t) = \int_0^v \int_0^t f(v, t) dv dt, \quad (13)$$

где  $f(v, t)$  — плотность распределения течения.

Аналогично распределению радиус-вектора и полярного угла скорости можно определить либо условную, либо полную функцию распределения продолжительности скорости течения.

В качестве примера приводим ниже функцию распределения продолжительности скорости течения в секторе  $\varphi_1 - \varphi_2 = 22,5^\circ$ . Так как продолжительность скорости течения зависит также от величины скорости, то для получения условной функции распределения продолжительности скорости течения желательно определить указанную функцию для отдельных интервалов скорости. Имея в виду интервал скорости от 3 до 5 см/сек, распределение продолжительности скорости течения также приближается к теоретическому распределению Пирсона.

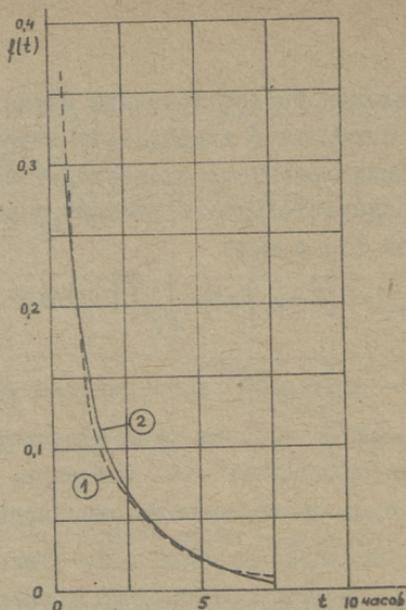
По формуле (9) для данного примера получаем, что при  $S = 2,72 \chi = -0,765$ ,  $r_3 = 1,43$ ,  $r_4 = 4,48$  и тем самым имеем кривую Пирсона типа I.

Уравнение плотности распределения продолжительности скорости течения для данного примера определяется в виде:

$$f(t) = 0,584(-6,0)^{-0,535} \left[ 1 + \frac{t}{-6,0} \right]^{-0,535} \left( 1 - \frac{t}{14} \right)^{4,25}, \quad (14)$$

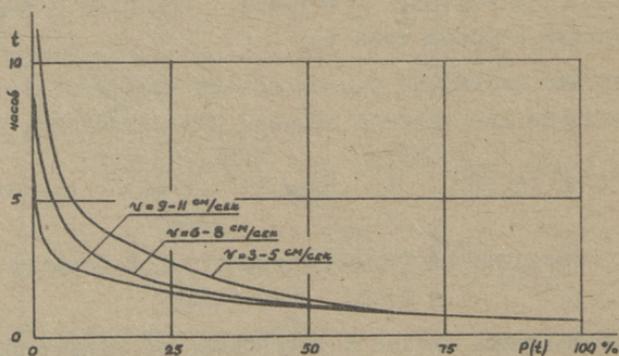
где  $t$  определяется формулой аналогичной формуле (12), если  $\bar{t} = 1,81$ ,  $\sigma = 1,568$ .

Статистическая кривая и теоретическая кривая, определяемые по формуле (4), а также плотность распределения продолжительности скорости течения в секторе от  $0^\circ$  до  $22,5^\circ$  приведены на фиг. 5.



Фиг. 5. Плотности распределения продолжительности скорости течения  
 1 - статистическая кривая, 2 - кривая Пирсонъ типа I

В результате расчета сходимости статистического и теоретического распределения продолжительности скорости течения (фиг. 5), при применении критерия Пирсона, получено  $P(\chi^2) > 0,80$ . На основании найденного результата можем утверждать, что кривая распределения Пирсона типа I действительно характеризует исследуемые распределения.



Фиг. 6. Кривые функции распределения и продолжительности скорости течения

Кривые функции распределения продолжительности периодов скорости течения для интервалов скорости  $v = 3 - 5$  см/сек,  $v = 6 - 8$  см/сек и  $v = 9 - 11$  см/сек приведены на фиг. 6.

Следует отметить, что хотя приведенные в качестве примера функции распределения и соответствуют первому типу кривых Пирсона, то в зависимости от значения среднего квадратического отклонения  $\sigma$ , коэффициента асимметрии  $\beta_3$  и эксцесса  $\beta_4$  могут иметь место и другие типы кривых распределения Пирсона.

#### Л и т е р а т у р а

1. А.М. Айтсам, Х.А. Вельнер, Л.Л. Пааль. О теоретических основах инженерного расчета смешения сточных вод в водоемах. Научные доклады по вопросам самоочищения водоемов и смешения сточных вод. Таллин, 1965.
2. Н.А. Лабзовский. Расчет ветровых колебаний уровня в восточной части Финского залива. Труды ГОИИ, вып. 69, 1962.
3. А.К. Митропольский. Техника статистических вычислений. М., 1961.



УДК 551.465(261.38)

В.К. Асток

О ХАРАКТЕРЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕЧЕНИЙ ПО ВЕРТИКАЛИ  
В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ МОРЯ \*

Данные о течениях, необходимые при проектировании морских глубоководных выпусков, должны характеризовать активный слой водных масс, т.е. слой, в котором имеет место перенос загрязнения и процессы турбулентной диффузии. Часто, ввиду разности удельных весов сточной и морской вод, активным слоем является самый верхний слой моря (до 5 м). Однако данные о поверхностных течениях, получаемые при помощи самопишущих приборов БПВ-2, относятся, как правило, к горизонту 14 м. Из практики постановки буйковых станций известно, что при глубине несущего буя меньше чем 10 м (соответственно — при горизонте установки БПВ выше, чем на 14 м), получаемые данные содержат большие ошибки, особенно по направлению течений. В учреждениях Гидрометслужбы горизонт 14 м принят как стандарт для наблюдений над течениями в поверхностном слое.

Следовательно, часто возникает необходимость определения параметров течений в слое 0-5 м по данным горизонта 14 м. В частности, такая необходимость имеется при расчете переноса загрязнений.

---

\* Настоящая работа выполнена в Научно-исследовательской лаборатории сантехники ТПИ под руководством доцентов, к.т.н. А.М. Айтсам и Л.Л. Пааль.

## В в е д е н и е

Как показывают Л. Пааль, А. Айтсам, В. Асток [3], непериодические течения можно в первом приближении рассматривать как систему из двух случайных величин (координат) и применить при исследовании аппаратуру теории вероятностей. В данной статье, которую следует считать продолжением [3], рассматриваются изменения по вертикали некоторых статистических параметров течений в поверхностном слое моря (0-20 м).

При исследовании системы случайных величин, согласно общеизвестным постулатам теории вероятностей, следует определить плотности распределения каждой случайной величины, входящей в систему. Таким образом, при системе

$$f(v, \varphi) = f(\varphi) \cdot f(v|\varphi), \quad (1)$$

где  $f(v, \varphi)$  — плотность распределения системы,  
 $f(\varphi)$  — плотность распределения направления течения,  
 $f(v|\varphi)$  — условная плотность распределения скорости течения,

определим плотность распределения одной величины  $f(\varphi)$  и условную плотность распределения второй величины  $f(v|\varphi)^*$ .

Следовательно, при изучении вопроса изменения распределения течений (системы случайных величин) по вертикали следует определить плотности распределения элементарных случайных величин и изучать их изменения в зависимости от глубины.

---

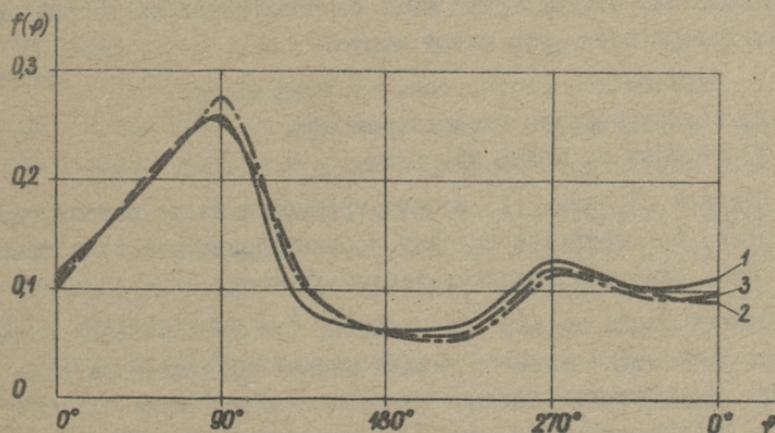
\* Условной плотностью скорости течения  $f(v|\varphi)$  называется плотность распределения при данном направлении течения ( $\varphi = \text{const.}$ ) или в данном секторе ( $\varphi_1 \leq \varphi < \varphi_2$ ). Применение условной плотности распределения указывает на то, что случайные величины, входящие в систему, считаются зависимыми. В дальнейшем для упрощения в тексте под символом  $\varphi$  подразумевается сектор ( $\varphi_1 \leq \varphi < \varphi_2$ ).

Исходным материалом являлись данные наблюдений над течениями, проведенных на плавучем маяке "Таллин" в 1929-32 гг. на горизонтах 0, 10 и 20 м [4]. Течения измерялись привязными поплавками 3 раза в сутки - в 07, 13 и 21 час. по местному времени. Плавмаяк находился примерно на осевой линии Финского залива, на меридиане о. Аэгна. Глубина моря около 25 м.

Распределение направления  
течения

Ввиду того, что в нашем случае данные по направлению течения содержат систематические ошибки субъективности (известная из метеорологии "нелюбовь" наблюдателей к промежуточным 3-буквенным румбам), данные сгруппированы в 8 рядов величиной секторов по  $45^{\circ}$ .

Статистические кривые плотности распределения направления течения  $f(\varphi)$  для горизонтов 0, 10 и 20 м приведены на фиг. 1.



Фиг. 1. Плотности распределения направления течения  $f(\varphi)$  на разных горизонтах: 1)  $z = 0$  м, 2)  $z = 10$  м, 3)  $z = 20$  м

Как видно из фиг. 1, все кривые имеют два максимума с интервалом  $\pi$ , которые соответствуют двум направлениям характерных течений, причем основной максимум имеет частоту около двух раз большую, чем вторичный максимум. Кривые распределения направлений течений исследуемого створа на всех горизонтах почти совпадают, что подтверждается довольно близкими к единице значениями соответствующих коэффициентов корреляции:

$$r_{0,10} = 0,978; \quad r_{0,20} = 0,988; \quad r_{0,20} = 0,995.$$

Из указанного следует, что при достаточно длинном ряде наблюдений плотность распределения направления течения почти не зависит от глубины, т.е.

$$f(\varphi|z) = f(\varphi) \quad (2)$$

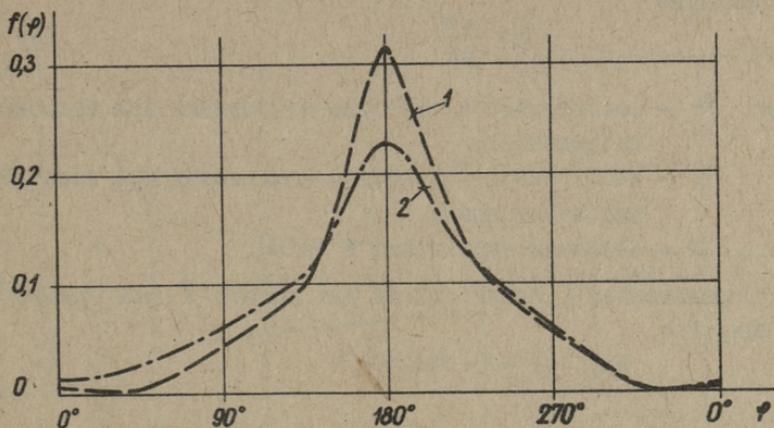
при  $z = 0 + 20$  м.

Данный вывод, строго говоря, относится только в одному пункту Финского залива с определенной глубиной. Все же нам кажется, что он может быть распространен на те районы Балтийского моря, где имеют место:

- 1) аналогичная плотностная стратификация,
- 2) незначительное влияние рельефа,
- 3) глубина не менее 25-30 м.

Другими словами, (2) распространяется на те районы, где условия, определяющие глубину проникновения поверхностных течений, близки к условиям нашего примера.

Отметим, что из (2) не следует, что определенному значению  $\varphi_0$  соответствует в данный момент определенное значение  $\varphi_z$ . Функциональная зависимость между ними отсутствует. Однако определенному  $\varphi_0$  соответствует вполне определенное распределение  $f(\varphi_z)$ . Для примера приведем одну пару кривых распределения для  $\varphi_0 = 180^\circ$  (фиг. 2).



Фиг. 2. Плотности распределения направления течения на разных горизонтах  $z$  при  $\varphi_0 = 180^\circ$ : 1)  $z = 10$  м 2)  $z = 20$  м

Из фиг. 2 видно, что направления течения, измеренные почти синхронно на глубинах 0 и 10 м, совпадают с вероятностью лишь  $p = 0,313$  (точность совпадения  $\pm 1$  румб); на глубинах 0 и 20 м -  $p = 0,226$ .

Более подробному исследованию вопроса зависимости течений на разных горизонтах будет посвящена специальная статья.

Необходимо еще определить длину ряда наблюдений, которая была бы достаточной для существования условия (2). При этом определяющее значение имеет интервал наблюдений  $\Delta t$ . Согласно Б.Н. Беляеву и В.С. Болдыреву [1], вектора течений можно в первом приближении считать независимыми при интервале времени  $\tau \sim 4$  часа, так как автокорреляционная функция  $B(\tau)$  при  $\tau = 4$  часа приближается к нулю. В нашем случае  $\Delta t = 6 + 10$  часов, следовательно, наблюдения независимы и достаточная длина ряда наблюдений  $N$  определяется только числом наблюдений  $n$  в ряде. В случае, когда  $\Delta t < 4$  часов (при применении самопишущих приборов типа БПВ),  $N$  определяется

по формуле

$$N = \frac{4N'}{\Delta t}, \quad (3)$$

где  $N$  — необходимое количество наблюдений при зависимых наблюдениях,

$N'$  — необходимое количество наблюдений при независимых наблюдениях,

$\Delta t$  — интервал наблюдений в часах.

Определение  $N'$  производится для любого  $\psi$  при предположении, что

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{m_z}{m_0} = K = \text{const} \sim 1, \quad (4)$$

где  $m_0, m_z$  — число появлений данного  $\psi$  при общем числе наблюдений  $n$  соответственно на горизонтах  $0$  и  $z$  м.

Следует также отметить, что  $\lim_{n \rightarrow \infty} K$  в общем случае может отличаться от  $1,0$  на некоторую малую величину. Если эта разность превышает  $\pm 0,20$ , то это указывает на существенное различие в природе течений на исследуемых горизонтах, которое следует учесть.

Отметим еще, что определение  $K$  следует производить с заданной точностью  $\Delta K$ , от которой в конечном счете зависит и получаемое значение  $N$ . Нами было выбрано  $\Delta K = \pm 0,1$  и  $\Delta K = \pm 0,05$ .

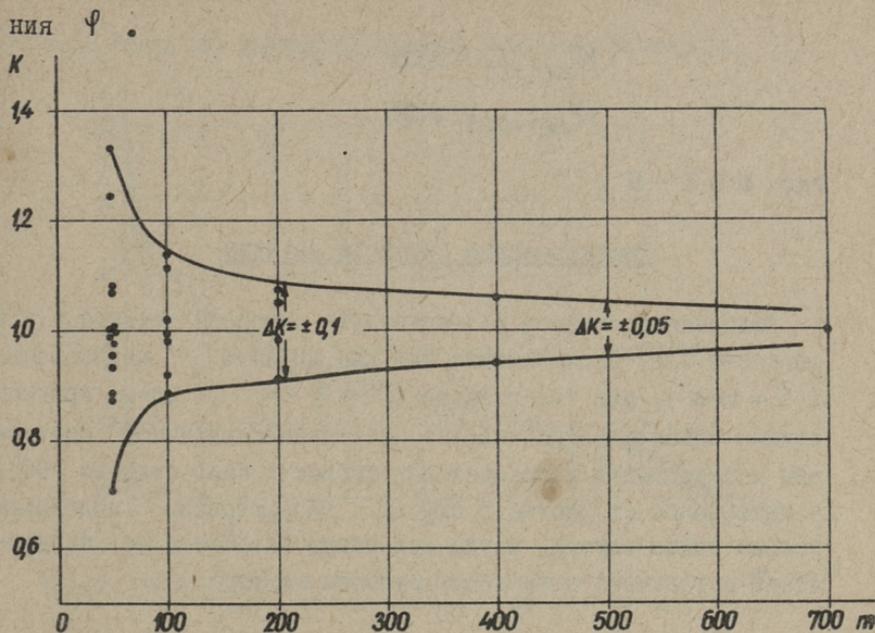
На фиг. 3 приведена зависимость  $K = f(m_0)$  для направления  $\psi = 90^\circ$ .

Из фиг. 3 видно, что при малом  $m_0$   $K$  является случайной величиной, которая, по-видимому, имеет нормальное распределение. С увеличением  $m_0$  (что, в общем, соответствует увеличению  $n$ ) размах распределения уменьшается. По графику фиг. 3 можно определить необходимое количество наблюдений  $M'$  в данном направлении для существования условия (2).

В нашем случае при  $\Delta K = \pm 0,1$   $M' \sim 200$ ;

при  $\Delta K = \pm 0,05$   $M' \sim 500$ .

Как показали наши данные,  $M'$  мало зависит от направле-



Фиг. 3. Зависимость  $K$  от числа наблюдений  $m_0$  :  
 $\varphi = 90^\circ$ ,  $x_0 = 0$  м,  $z_1 = 10$  м

Следовательно, можно ограничиться определением  $M'$  только в одном секторе.  $N'$  вычисляется через  $M'$

$$N' = \frac{M'}{f(\varphi)}, \quad (5)$$

где  $f(\varphi)$  — вероятность направления течения в данном секторе.

Легко заметить, что  $N'$  будет максимальным, если  $f(\varphi)$  выбирается минимальная. Чтобы получить достоверные данные и для тех секторов, где число наблюдений небольшое, следует  $f(\varphi)$  выбирать минимальное (по кривой плотности распределения), т.е. вычислить  $N'$  по формуле

$$N' = \frac{M'}{f(\varphi)_{\min}}. \quad (5a)$$

В нашем случае  $f(\varphi)_{\min} = 0,06$ . Зависимо от желаемой точности определения  $K$  получим:

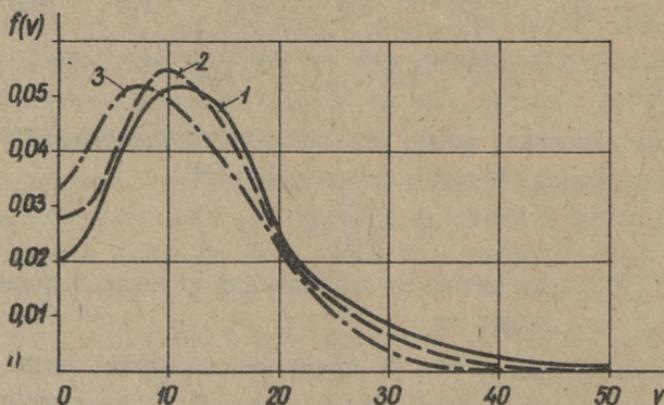
$$N'_{\Delta K = \pm 0,1} = 3333 ,$$

$$N'_{\Delta K = \pm 0,05} = 8333 ,$$

где  $\Delta K = I - K$  .

### Распределение скорости течения

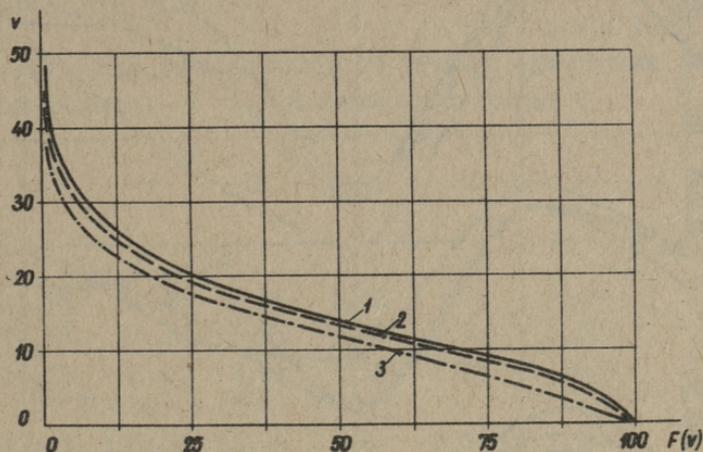
Условная плотность распределения скорости течения  $f(v|\varphi)$ , согласно [3], определяется или для данного направления ( $\varphi = \text{const.}$ ), или для сектора ( $\varphi_1 \leq \Phi < \varphi_2$ ). Из-за сравнительно небольшого количества наблюдений величиной сектора для исследования распределения скорости было принято  $90^\circ$ , а интервалом скоростей 3 см/сек. Рассмотрению подлежали только такие случаи, когда вся эпюра скоростей по направлению оставалась в пределах данного сектора.



Фиг. 4. Условная плотность распределения скоростей течения  $\varphi = 270^\circ + 359^\circ$ : 1)  $z = 0$  м, 2)  $z = 10$  м, 3)  $z = 20$  м

На фиг. 4 приведены кривые плотностей распределения  $f(v|\varphi)$  при  $\varphi = 270^\circ + 359^\circ$  для разных  $z$ , а на фиг. 5 - аналогичные интегральные функции распределения тех же ве-

личин. Такие же кривые построены для всех секторов.



Фиг. 5. Условная функция распределения скоростей течения  $\varphi = 270^\circ + 359^\circ$   
1)  $z = 0$  м, 2)  $z = 10$  м, 3)  $z = 20$  м

Для сравнения полученных распределений были вычислены их моменты и некоторые другие характеристики (табл. I).

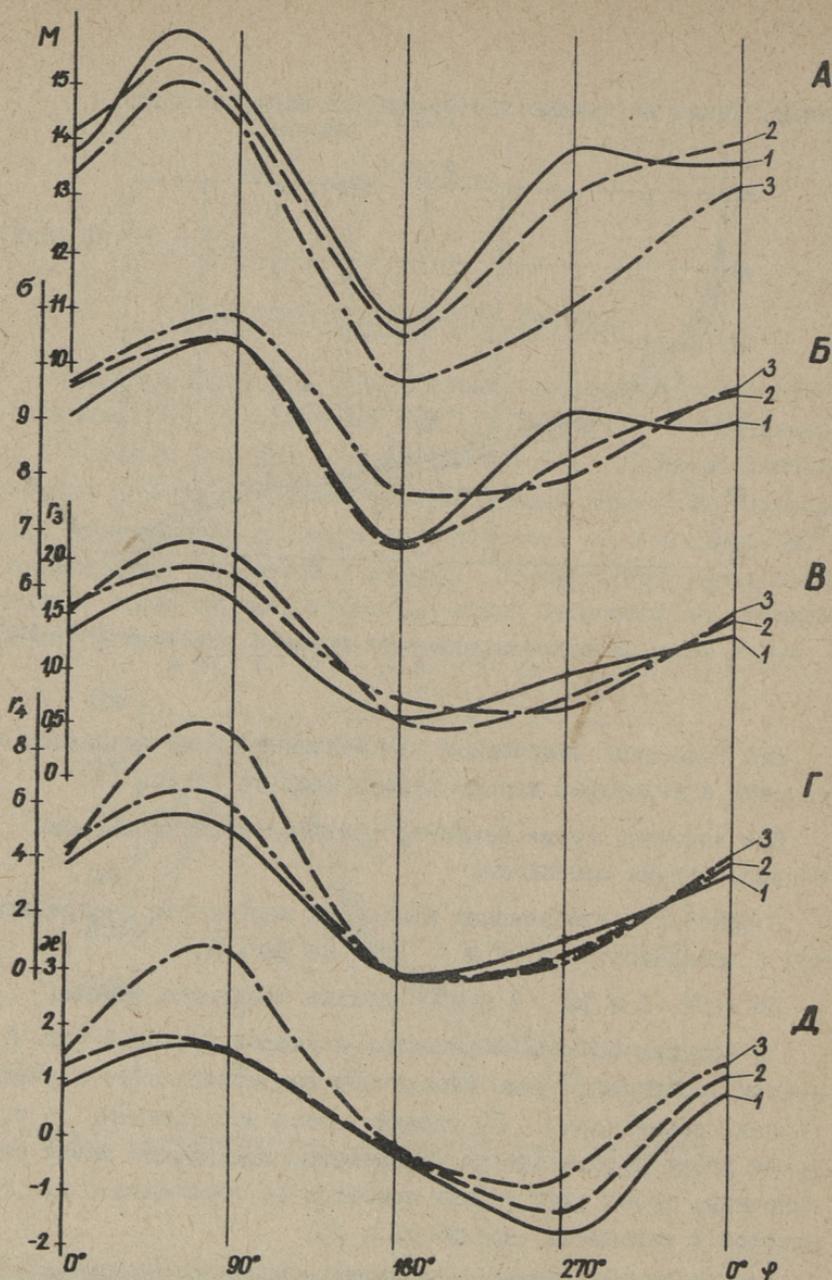
Все моменты, кроме первого, являются центрированными и нормированными моментами.

Графическое изображение изменения параметров распределения в зависимости от  $\varphi$  и  $z$  дано на фиг. 6.

По табл. I и фиг. 6 можно сделать следующие выводы:

I. Моменты на всех горизонтах являются функцией от  $\varphi$ , причем наблюдается явно выраженная закономерность: с увеличением вероятности  $f(\varphi)$  увеличиваются все моменты, т.е. имеет место положительная корреляция. Все кривые имеют один максимум, кроме двух первых моментов на горизонте 0 м, где имеется 2 максимума (сравни фиг. I).

2. Моменты не имеют закономерного хода по вертикали, кроме первого момента, который уменьшается с увеличением глубины. Разности всех моментов при  $\varphi = \text{const.}$  на разных горизонтах в несколько раз меньше, чем разности при  $z = \text{const.}$



Фиг. 6. Параметры распределения скоростей течений на разной глубине в зависимости от направления течений: 1)  $z=0$  м, 2)  $z=10$  м, 3)  $z=20$  м, а) математическое ожидание  $M$ , б) среднее квадратичное отклонение  $\sigma^2$ , в) коэффициент асимметрии  $\gamma_3$ , г) коэффициент эксцесса  $\gamma_4$ , д) критерий  $\epsilon$

при разных направлениях, т.е. зависимость моментов от  $\varphi$  более тесная, чем от  $z$ .

Т а б л и ц а I

Моменты распределения скорости течения при разных направлениях  $\varphi$  и горизонтах наблюдения  $z$

Горизонт $z$ (м)	M	D	$\sigma$	$\Gamma_3$	$\Gamma_4$	$\chi^2$	Тип кривой Пирсона
$\varphi = 0^\circ + 89^\circ$							
0	13,75	81,98	9,05	1,32	3,75	0,844	IУ
10	14,18	91,26	9,55	1,45	4,15	1,207	УI
20	13,31	92,60	9,62	1,50	4,33	1,424	УI
$\varphi = 90^\circ + 179^\circ$							
0	14,93	109,08	10,44	1,61	4,95	1,494	УI
10	14,56	107,45	10,37	2,05	8,48	1,499	УI
20	14,31	118,34	10,88	1,82	5,64	3,395	УI
$\varphi = 180^\circ + 269^\circ$							
0	10,74	45,15	6,72	0,57	-0,04	-0,252	IA
10	10,50	43,85	6,62	0,51	-0,06	-0,233	IA
20	9,61	57,99	7,62	0,70	-0,06	-0,264	IB
$\varphi = 270^\circ + 359^\circ$							
0	14,00	84,38	9,19	0,99	1,20	-1,763	IA
10	13,14	70,43	8,39	0,76	0,68	-1,349	IA
20	11,08	63,60	7,97	0,67	0,41	-0,709	IA

M — математическое ожидание,

D — дисперсия,

$\sigma$  — среднее квадратичное отклонение,

$\Gamma_3$  — коэффициент асимметрии,

$\Gamma_4$  — коэффициент эксцесса,

$\chi^2$  — критерий для определения типа кривых Пирсона.

5. Все кривые распределения характеризуются положительным коэффициентом асимметрии ( $\Gamma_3 = 0,5 + 2,0$ ) и положительным коэффициентом эксцесса ( $\Gamma_4 > 0$ ), кроме направления  $180^\circ-259^\circ$ , где  $\Gamma_4 \sim 0$ .

4. Среднее квадратичное отклонение  $\sigma$  меняется в пределах от 6,5 до 11 см/сек.

Иными словами, в основном направлении характерных течений распределение скорости течения характеризуется максимальным математическим ожиданием и максимальным среднеквадратическим отклонением, а также наибольшими значениями коэффициентов асимметрии эксцесса.

Для определения типа кривых распределения Пирсона, соответствующих полученным эмпирическим кривым распределения скоростей течения, был вычислен критерий  $\chi$

В таблице I и на фиг. 6д приведены изменения  $\chi$  в зависимости от  $\varphi$  и  $z$ . Согласно А.К. Митропольскому [2]

$$\chi = -\frac{r_3^2(s+2)^2}{16(s+1)}, \quad (6)$$

где

$$s = \frac{6(r_4' - r_3^2 - 1)}{3r_3^2 - 2r_4' + 6},$$

$$r_4' = r_4 + 3.$$

Из фиг. 6 д следует, что кривые распределения скорости течения выражены разными типами кривых Пирсона, т.е. разными уравнениями. При этом имеет место закономерность, что в основном направлении характерных течений кривые распределения относятся к типу УI, при противоположном направлении - к типу IA и IB. В промежуточных направлениях возможны кривые практически всех типов (I, II, IU, V, VI, VII).

Основные типы кривых распределения в нашем случае (типы I и VI) выражаются следующими уравнениями [2]

$$\text{тип I: } f_I(v) = f_{I,0} \cdot \left(1 + \frac{v}{l_1}\right)^{q_1} \left(1 - \frac{v}{l_2}\right)^{q_2}, \quad (7)$$

$$\text{тип VI: } f_{VI}(v) = f_{VI,0} (v-l)^{q_1} v^{-q_2}, \quad (8)$$

где  $q_1, q_2, l_1, l_2, l$  — функции от моментов распределения [2].

Для примера приведем уравнение (типа IA) для  $\Psi = 270 + 359^\circ$ ,  $z = 0$  м:

$$f(v) = 0,0447 \left(1 + \frac{v}{11,25}\right)^{1,612} \left(1 - \frac{v}{146,80}\right)^{22,306}$$

## Выводы

1. Плотность распределения направления течения  $f(\Psi)$  при  $z = 0 + 20$  м практически не зависит от  $z$  (коэффициент корреляции  $r > 0,97$ ). Следовательно, направления течения, измеренные на любом горизонте данного поверхностного слоя, характеризуют весь слой, если длина ряда наблюдений достаточная ( $n \geq N$ ).

2. Условная плотность распределения скорости течения  $f(v|\Psi)$  зависит от глубины, но изменения параметров распределения по глубине не закономерные (кроме первого момента  $M$ ). Изменения моментов распределения в зависимости от  $\Psi$ , а также от  $f(\Psi)$ , в несколько раз больше. Следовательно, при изучении скорости течений рассмотрение плотности распределения независимо от направления неоправдано. Более точные результаты дает определение условных плотностей при  $\Psi_1 \leq \Psi < \Psi_2$ . Значения  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$ , т.е. пределы сектора, следует выбирать с учетом  $n$ , но при этом сектор не должен превышать  $90^\circ$ .

3. В первом, довольно грубом приближении распределение скорости на поверхности можно характеризовать по данным горизонта 14 м.

4. Для получения более точных данных о распределении поверхностных течений необходимо скорость течения измерять в поверхностном слое, а направление его на глубине 14–20 м. Можно полагать, что такой комбинированный способ применим и дает хорошие результаты с приборами БПВ, в которых, как из-

вестно, волнение незначительно влияет на регистрацию скоростей.

#### Л и т е р а т у р а

1. Б.Н. Беляев, В.С. Болдырев. Применение теории случайных функций к изучению морских течений. *Океанология*, III, 6, 1963.
2. А.К. Митропольский. *Техника статистических вычислений*, М., 1961.
3. Л.Л. Пааль, А.М. Айтсам, В.К. Асток. О методике определения расчетных скоростей и продолжительностей течений, определяющих распространение веществ загрязнения в морских заливах (См. настоящий сборник).
4. *Merevee temperatuuri, soolsuse ja voolu vaatlused 1929-1934. Tartu Ülikooli Eesti Veekogude Uurimise Komisjoni väljaanne Nr.25, Tartu, 1936.*

УДК 628.394

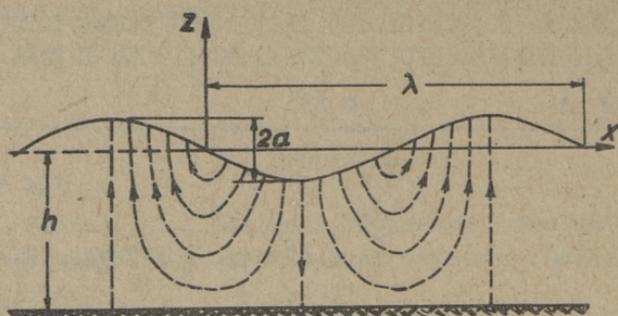
А.М.Айтсам, Л.Л.Пааль, Х.А.Тибар

К ВОПРОСУ ВЕРТИКАЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ СТОЧНЫХ  
ВОД В НЕПРОТОЧНЫХ ВОДОЕМАХ

При спуске сточных вод в непроточные водоемы значение какого-нибудь показателя загрязнения (концентрация, число бактерий и т.д.) в произвольной точке водоема является функцией координат, времени, расхода сточных вод, способа инженерного управления смещения (конструкций выпуска) и расчетных гидрологических условий водоема [1]. При этом под расчетными гидрологическими режимами водоемов следует подразумевать расчетные режимы течений, волнений и вертикальные эпюры объемных весов воды водоема в пункте спуска сточных вод.

В настоящей работе освещены вопросы вертикального смещения сточных вод под влиянием волнения в непроточных водоемах. Смещение, обусловленное волнением, зависит в первую очередь от координат рассматриваемой точки ( $x, y, z$ ), от глубины водоема  $h$ , от высоты волны  $2a$ , от длины ее  $\lambda$  и от периода  $T$  (фиг. 1).

Рассмотрим плоскую задачу в плоскости  $x-z$ . Как известно, теория гравитационных волн полагает, что жидкость является идеальной, т.е. несжимаемой и однородной. При отыскании потенциала скорости  $\varphi(x, y, z, t)$  волнового движения необходимо интегрировать уравнение Лапласа. Для



Фиг. 1.

определения динамического граничного условия исходим из интеграла Лагранжа [2]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{v^2}{2} + gz + \frac{p - p_0}{\rho} = 0 \quad (1)$$

Предполагая давление  $p$  на свободной поверхности жидкости равным атмосферному  $p_0$  и выражая проекции скорости через потенциал  $\varphi$ , получим:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] + gz_b = 0 \quad (2)$$

где  $z = z_b$  координата свободной поверхности,

$$z_b = f(x, y, t) \quad .$$

Такое нелинейное граничное условие является основой при разработке теории волн конечной амплитуды.

Для упрощения вопроса часто рассматривают такую задачу, где волны имеют малую величину отношения высоты к длине, а следовательно, и малые скорости движения частиц жидкости. В таком случае вместо уравнения (2) получим:

$$z_b = -\frac{1}{g} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (3)$$

Кинематическое граничное условие можно получить, сопоставляя вертикальные проекции скорости частиц, вычисляемые различными способами. Вследствие потенциальности движения  $v_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z}$ , с другой стороны, по формуле кинематики точки  $v_z = \frac{dz_b}{dt}$ . Так как данная частица жидкости с течением времени меняет все свои координаты в пространстве, имеем:

$$v_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{dz_b}{dt} = \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial z_b}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial z_b}{\partial y} \frac{dy}{dt} \quad (4)$$

Учитывая, что

$$\frac{dx}{dt} = v_x \quad \text{и} \quad \frac{dy}{dt} = v_y,$$

получим

$$v_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial z_b}{\partial x} v_x + \frac{\partial z_b}{\partial y} v_y \quad (5)$$

Найденное граничное условие справедливо для волн конечной амплитуды. Если волны имеют относительно малую амплитуду, то тангенсы углов наклона свободной поверхности  $\frac{\partial z_b}{\partial x}$  и  $\frac{\partial z_b}{\partial y}$  представляют малые величины и ими можно пренебречь. В таком случае получим упрощенное выражение кинематического граничного условия для малых волн:

$$v_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \quad (6)$$

Применяя для отыскания потенциала скорости  $\varphi$  гравитационной волны метод Фурье [2] и учитывая граничные условия (3) и (6), получим для плоской стоячей волны:

$$\varphi = \frac{\alpha g}{\sigma \operatorname{ch} kh} \cos \sigma t \sin kx \operatorname{ch} \kappa(z+h), \quad (7)$$

где 
$$\sigma = \sqrt{gk \operatorname{th} kh} \quad (8)$$

и

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (9)$$

Уравнение (7) характеризует периодическое волнение с постоянной амплитудой и частотой. Учитывая, что морские ветровые волны нерегулярны (с переменной амплитудой и с переменной длиной волны), вводим понятие о расчетной модели волны с какой-то обеспеченностью, характерной для данного водоема.

Вертикальное смещение в водоеме происходит под влиянием вертикальной проекции скорости  $V_z$ , которую можно определить из уравнения (7)

$$V_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{agk}{\sigma} \frac{\text{sh } k(z+h)}{\text{ch } kh} \cos \sigma t \sin kx \quad (10)$$

Схема линии тока, построенная по формуле (10), указана на фиг. 1.

Элементарная масса жидкости, проходящая в течение времени  $dt$  через горизонтальную элементарную площадку  $d\omega = l \cdot dx$  со скоростью  $V_z$ , равна

$$dm = \rho V_z \cdot dx \cdot dt$$

или учитывая (10):

$$dm = \rho \frac{agk}{\sigma} \frac{\text{sh } k(z+h)}{\text{ch } kh} \cos \sigma t \sin kx \cdot dx \cdot dt \quad (11)$$

Для определения обмена массы жидкости в вертикальном направлении, обусловленного волнением, рассмотрим движение элементарной массы жидкости со скоростью  $V_z$ , которая зависит от координат  $(x, z)$ . Прежде всего определяем массу жидкости, движущуюся сверху вниз в течение одного периода волны на протяжении произвольного отсека по длине волны. При таких условиях  $x$  изменяется в пределах от  $\lambda \frac{\mu-1}{m}$  до  $\lambda \frac{\mu}{m}$ , где  $\mu = 1, 2, 3, \dots, m$  и  $m$  положительное целое число, а время  $t$  изменяется в пределах от  $-\frac{\tau}{4}$  до  $+\frac{\tau}{4}$ . При этом период волны равен

$$\tau = \frac{2\pi}{\sigma} = \frac{2\pi}{\sqrt{gk \text{ th } kh}} \quad (12)$$

В результате интегрирования элементарной массы получим:

$$M_z = \rho \frac{agk}{\sigma} \frac{\text{sh } k(z+h)}{\text{ch } kh} \int_{-\frac{\pi}{4}}^{+\frac{\pi}{4}} \int_{\frac{\mu-1}{m}\lambda}^{\frac{\mu}{m}\lambda} \cos \sigma t \sin kx \cdot dt \cdot dx =$$

$$= 2\rho \frac{ag}{\sigma^2} \frac{\text{sh } k(z+h)}{\text{ch } kh} \left[ \cos 2 \frac{\mu-1}{m} \pi - \cos 2 \frac{\mu}{m} \pi \right], \quad (13)$$

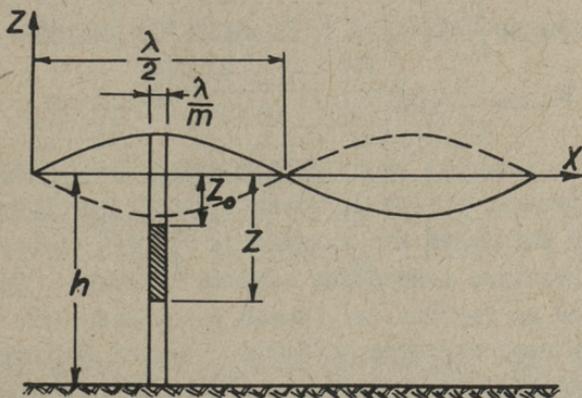
или подставляя в (13) выражение (8) получим

$$M_z = 2\rho \frac{a}{k} \frac{\text{sh } k(z+h)}{\text{sh } kh} \left[ \cos 2 \frac{\mu-1}{m} \pi - \cos 2 \frac{\mu}{m} \pi \right]. \quad (14)$$

Уравнение (14) определяет массу жидкости, движущуюся в течение одного периода в вертикальном направлении (сверху вниз или снизу вверх) через горизонтальное поперечное сечение площадью  $\frac{\lambda}{m} \cdot I$ , расположенное на глубине  $z$ .

Отношение этой движущейся массы, определяемой формулой (14), к суммарной массе на протяжении  $\frac{\lambda}{m}$  (фиг. 2):

$$M_0 = \rho \frac{\lambda}{m} |z - z_0|$$



Фиг. 2

дает коэффициент относительного обмена массы в течение одного периода волны:

$$\beta_{\text{теор}} = \frac{M_z}{M_0} = m \frac{a}{\pi |z - z_0|} \frac{\text{sh } \kappa(z+h)}{\text{sh } \kappa h} \left[ \cos 2 \frac{\mu-1}{m} \pi - \cos 2 \frac{\mu}{m} \pi \right]. \quad (15)$$

Обозначим  $z = -nh$ , где  $0 \leq n \leq 1$ . Тогда уравнение (15) можно представить в виде:

$$\beta_{\text{теор}} = m \frac{a}{\pi |nh - z_0|} \frac{\text{sh } 2\pi \frac{h}{\lambda} (1-n)}{\text{sh } 2\pi \frac{h}{\lambda}} \left[ \cos 2 \frac{\mu-1}{m} \pi - \cos 2 \frac{\mu}{m} \pi \right]. \quad (16)$$

Выражение (16) определяет относительный обмен массы в течение одного периода волны в столбе жидкости, объем которого равняется  $\frac{\lambda}{m} (z - z_0)$ . Также выражение (16) определяет обусловленные волнением изменения распределения концентрации по вертикали какого-то вещества. Если, например, общую длину волны разделить на 40 равных частей ( $\mu = 40$ ), тогда получим в первом приближении обмен массы по вертикали. В вертикали у вершины волны ( $\mu = 10$ ) получим максимальное значение коэффициента  $\beta$ :

$$\beta_{\text{теор, макс}} = 6,26 \frac{a}{\pi |nh - z_0|} \frac{\text{sh } 2\pi \frac{h}{\lambda} (1-n)}{\text{sh } 2\pi \frac{h}{\lambda}}. \quad (17)$$

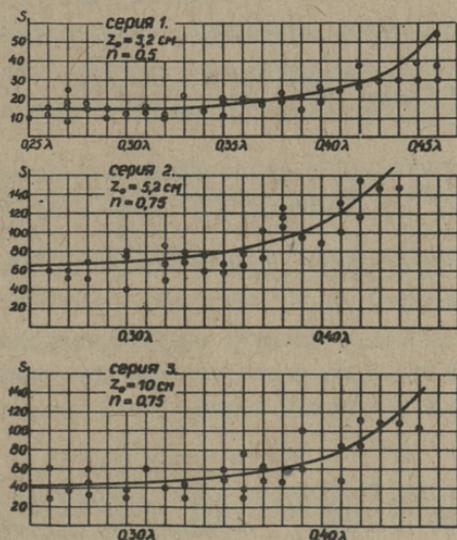
В среднем по длине  $0,5 \lambda$  (если  $m = 2$ ) получим:

$$\beta_{0, \text{теор}} = 4 \frac{a}{\pi |nh - z_0|} \frac{\text{sh } 2\pi \frac{h}{\lambda} (1-n)}{\text{sh } 2\pi \frac{h}{\lambda}}. \quad (18)$$

Обратная величина этого коэффициента  $S = \frac{1}{\beta}$  определяет число периодов, в течение которых происходит прохождение некоторой начальной массы жидкости  $M_0 = \rho \frac{\lambda}{m} (z - z_0)$  через горизонтальное поперечное сечение площадью  $\frac{\lambda}{m} \cdot I$ , расположенное на глубине  $z$ . Можно утверждать, что после  $S = \frac{1}{\beta}$  периода гарантируется прибытие частиц жидкости от глубины  $z_0$  до глубины  $z$  (или от глубины  $z$  до глубины  $z_0$ ).

С целью проверки вышеуказанных теоретических рассуждений производили ряд опытов в стеклянном лотке шириной 30 см, длиной 8,0 м, где плоские стоячие волны были получены с помощью наклонного качающегося щита. Параметры волны при этих

опытах были:  $\lambda = 42,0$  см;  $a = 4,6$  см;  $h = 25,7$  см;  $\tau = 0,75$  сек;  $z_0 = 5,2$  см и  $z_0 = 10,0$  см;  $n = 0,5$  и  $n = 0,75$ . При каждом отдельном опыте в воду в разных вертикалях вводили  $10 \text{ см}^3$  краски с объемным весом, равным объемному весу воды. При этом наблюдали за обменом краски с окружающей ее массой воды. Следует отметить, что при этих опытах не ставалась целью определить распределение концентрации краски по вертикали. Эффект смещения оценили регистрацией числа периодов, в течение которых первые частицы краски прибывали от места спуска  $z_0$  до глубины  $0,5h$  или  $0,75h$ . Впуск краски в воду производился через тонкую трубку вертикально снизу вверх.



Фиг. 3

Результаты опытов представлены на графиках фиг. 3, где по вертикальной оси нанесено число периодов  $S$ , необходимое для прибытия краски от места спуска до глубины  $nh$ , а по горизонтальной оси место спуска краски по длине волны (в диапазоне  $0,25 \lambda$  до  $0,50 \lambda$ ).

Опыты показали, что действительное число периодов  $S$ , требуемое для прибытия краски от места спуска до глубины  $nh$ , двукратно превышает его теоретическую величину, т.е.

$$S = \alpha S_{\text{теор}} \quad (19)$$

где

$$S_{\text{теор}} = \frac{1}{\beta_{\text{теор}}}$$

и  $\alpha = 2 - 2,5$ .

Кроме опытных точек на графике фиг. 3 нанесены и кривые  $\alpha \cdot S_{\text{теор}} = f(x)$ , где значения  $S_{\text{теор}}$  рассчитаны по формуле (16).

Если воспользоваться коррективом  $\alpha = 2,5$  также и в интервале  $0,5 \lambda$ , тогда по формуле (18) получим:

$$S_0 = 2,5 S_{0,\text{теор}} = 1,96 \frac{|\ln h - z_0|}{\alpha} \frac{\text{sh } 2\pi \frac{h}{\lambda}}{\text{sh } 2\pi \frac{h}{\lambda} (1-n)} \quad (20)$$

Применение формулы (20) справедливо для оценки вертикального смещения, обусловленного волнением водоема.

Для иллюстрации вышеуказанного представим следующий пример.

Выбираем расчетную волну с параметрами, измеренными по данным В.С. Шайтана на водохранилище Каховки: длина  $\lambda = 6$  м, высота  $2a = 0,6$  м, период волны  $\tau = 3$  сек, глубина водохранилища  $h = 6$  м.

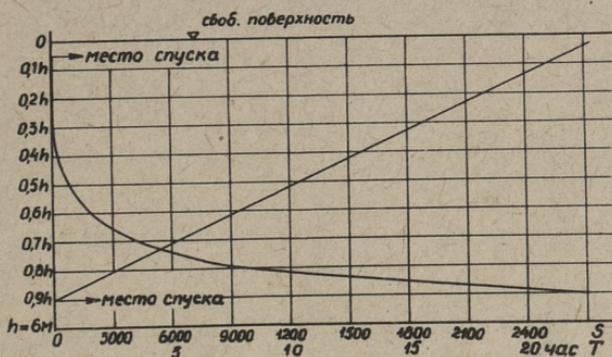
По этим данным по формуле (20) определили число периодов  $S_0$  и время  $T_0 = \tau S_0$  в часах, необходимое для прибытия частиц воды от глубины  $z_0 = 0,3$  м до текущей глубины  $nh$  (сверху вниз), а также от глубины  $0,9h$  до текущей глубины  $z_0$  (снизу вверх).

В первом случае получим на основе формулы (20)

$$S_0 = 3500 \frac{6n - 0,3}{\text{sh } 2\pi(1-n)} ,$$

а во втором случае:

$$S_0 = 5220 (5,4 - z_0) .$$



Фиг. 4

Результаты обоих расчетов приведены на графике Фиг. 4, где по вертикальной оси откладывались значения глубины  $h$ , а по горизонтальной оси число периодов  $S_0$  и время  $T_0$  в часах.

Вышеизложенное является первоначальной попыткой оценить влияние волнения на смещение сточных вод в водоемах. Формула (20) применима в практических приложениях для оценки вертикального смещения в водоемах. Учет влияния волнения позволяет увеличить расчетную загрузку сточных вод в водоеме по сравнению с нормативными данными.

### Л и т е р а т у р а

1. А.М. Айтсам, Л.Л. Пааль, Х.А. Вельнер. Об основах инженерного расчета самоочищения непроточных водоемов. Научные доклады по вопросам самоочищения водоемов и смещения сточных вод. Таллин, Ротапринт ТПИ, 1965.
2. Я.И. Войткунский. Теория волн и волнового сопротивления. Ленинград, 1959.
3. В.С. Шайтан. Исследование ветровых волн на водохранилище. Труды гидравлической лаборатории ВНИИ ВОДГЕО, сб. № 9, 1962.



СБОРНИК СТАТЕЙ  
ПО САНИТАРНОЙ ТЕХНИКЕ Ш  
Таллинский политехнический институт  
Редактор Л. Тепакс  
Технический редактор Л. Лоопер

Сдано в набор 10.П.1966. Подписано к печати  
21.П.1966. Бумага 60x90, 1/16. Печ. л. 6,75.  
Уч.-изд. л. 5,5. Тираж 500. Зак. № 96 МВ02924  
Таллин, Пикк ялг 14

Цена 37 коп.



**Цена 37 коп.**