

ГОУ ВПО Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (г. Макеевка, Донецкая Народная Республика)

**Уварова Александра Михайловна** (магистрант)

**Заворотный Дмитрий Викторович** (научный руководитель, контактное лицо), e-mail: d.v.zavorotnyi@dannasa.ru

тема магистерской диссертации: «Совершенствование теоретической модели, определяющей гидродинамику токов в эрлифтных биореакторах-осветлителях» (подразделы, выполненные при помощи расчётов в программном комплексе FlowVision)

### **3.2 Поисковые исследования по определению эмпирических коэффициентов и рациональной модели турбулентности**

Ключевым моментом при расчёте турбулентных течений является выбор модели турбулентности, наиболее подходящей для конкретных условий. При моделировании в программном комплексе FlowVision обтекания тела потоком, в зависимости от параметра  $y^+$ , который можно рассматривать как локальное число Рейнольдса в ячейке, рекомендуется применять стандартную  $k-\varepsilon$  (KES), квадратичную  $k-\varepsilon$  модель (KEQ) или комбинацию  $k-\varepsilon$  и  $k-\omega$  моделей - SST-модель (SST) [45].

Для выявления полуэмпирической модели, которая является наиболее подходящей для расчёта водоворотной зоны эрлифтного биореактора-осветлителя, были приведены расчёты скоростей воды в расчётной области при равных условиях, поддерживающихся при следующих параметрах:

- геометрическая модель, выполненная по размерам, приведённым на рисунке 2.1, представлена на рисунке 3.4;

- массовая скорость в сечении входа в расчётную область 1 (см. рис. 3.1) составляет  $11 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , что соответствует интенсивности циркуляции  $I_{\text{ц}} = 200 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;

- принята интенсивность турбулентности (турбулентная энергия, турбулизация, пульсации)  $I_t = 0,1$  – с учётом рекомендаций, приведённых в интерфейсе препроцессора FlowVision и предварительных поисковых запусков расчёта;

- масштаб турбулентности назначен 0,0095 – из расчёта равенства максимального размера вихря ширине подковырьковой зоны экспериментальной модели эрлифтного биореактора-осветлителя (0,095 м) и принятой интенсивности турбулентности;

- отсутствует нагрузка на осветлитель (скорость воды в сечении выхода очищенной жидкости 2 равна нулю);

- сечение выхода воды из расчётной области в затопленный эрлифт 3 обозначено как свободный выход.

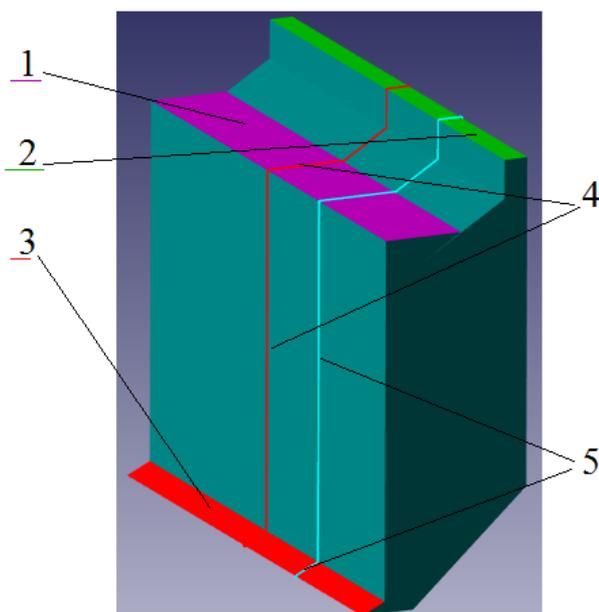


Рисунок 3.4 – Геометрическая модель эрлифтного биореактора-осветлителя в программном комплексе FlowVision

1 – сечение входа в расчётную область; 2 – сечение выхода очищенной жидкости; 3 – сечение выхода жидкости из расчётной области в затопленный эрлифт; 4 – плоскость №1 для фиксации гидродинамических параметров; 5 – плоскость №2 для фиксации гидродинамических параметров.

На рисунке 3.5 представлены результаты вычислений величин скоростей в сечении №1 программным комплексом FlowVision при использовании

различных полуэмпирических моделей турбулентности: KES, KEQ, SST, а также KEFV – k-ε модель с модификациями FlowVision.

Анализ результатов говорит о нецелесообразности применения SST и KES моделей, поскольку вблизи сечения выхода осветлённой жидкости образуются значительные скорости при отрыве от остальных интенсивных потоков. Такой эффект не представляется возможным при нулевой производительности эрлифтного биореактора-осветлителя. Полученные величины не обоснованы и не соответствуют реальным токам в эрлифтном биореакторе-осветлителе при отсутствии нагрузки на осветлитель. k-ε модель FlowVision (KEFV) и KEQ дают правдоподобные результаты: в подковырьковой зоне образуется водоворотная зона, наблюдаемая при экспериментальном рассмотрении вопроса. На представленных изображениях (рис. 3.5 в, г) об этом свидетельствуют кольцевое расположение точек с повышенными скоростями.

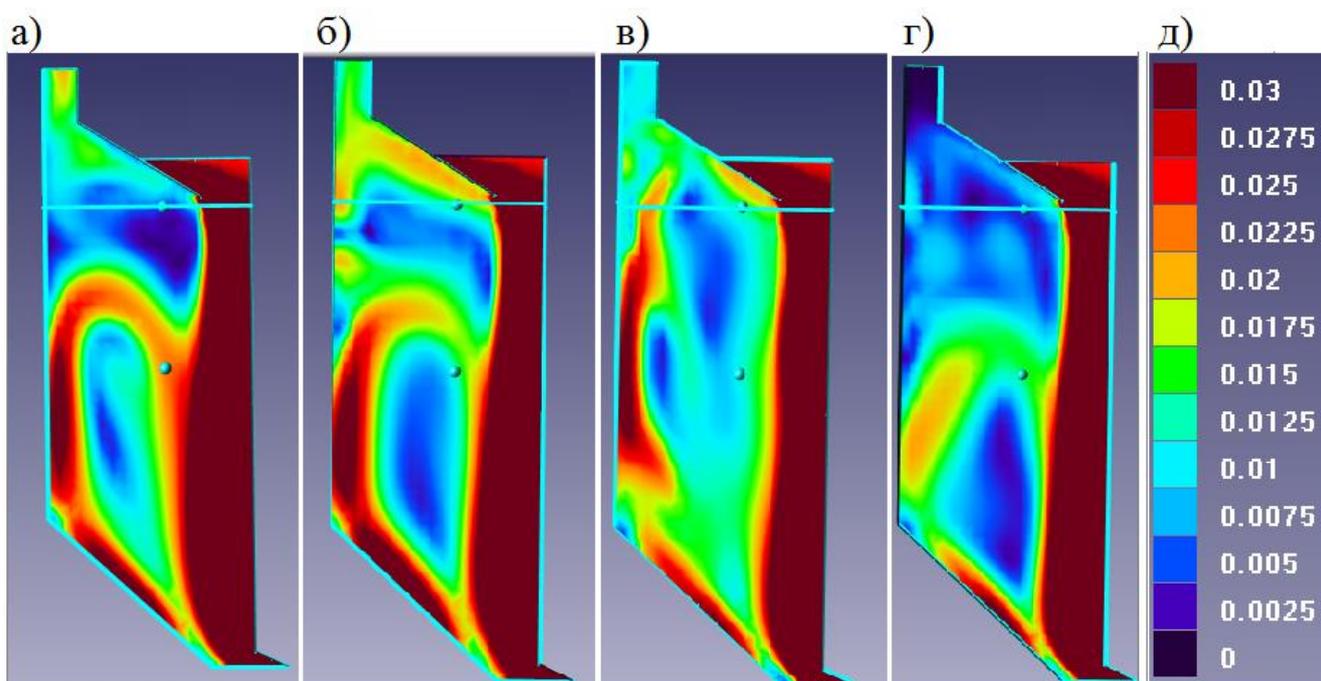


Рисунок 3.5 – Результаты вычислений величин скорости в плоскости №1 модели эрлифтного биореактора-осветлителя при  $I_{\text{л}} = 200 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ : а – при использовании SST-модели; б – при использовании стандартной k-ε модели; в – при использовании k-ε модели FlowVision; г - при использовании

квадратичной k-ε модели; д – шкала цветового обозначения величин скорости, м/с

На рисунке 3.6 представлены результаты вычислений в контрольной плоскости №2 для полуэмпирических моделей турбулентности KEQ и KEFV, которые по результатам анализа скоростей в плоскости №1 показали хорошие результаты.

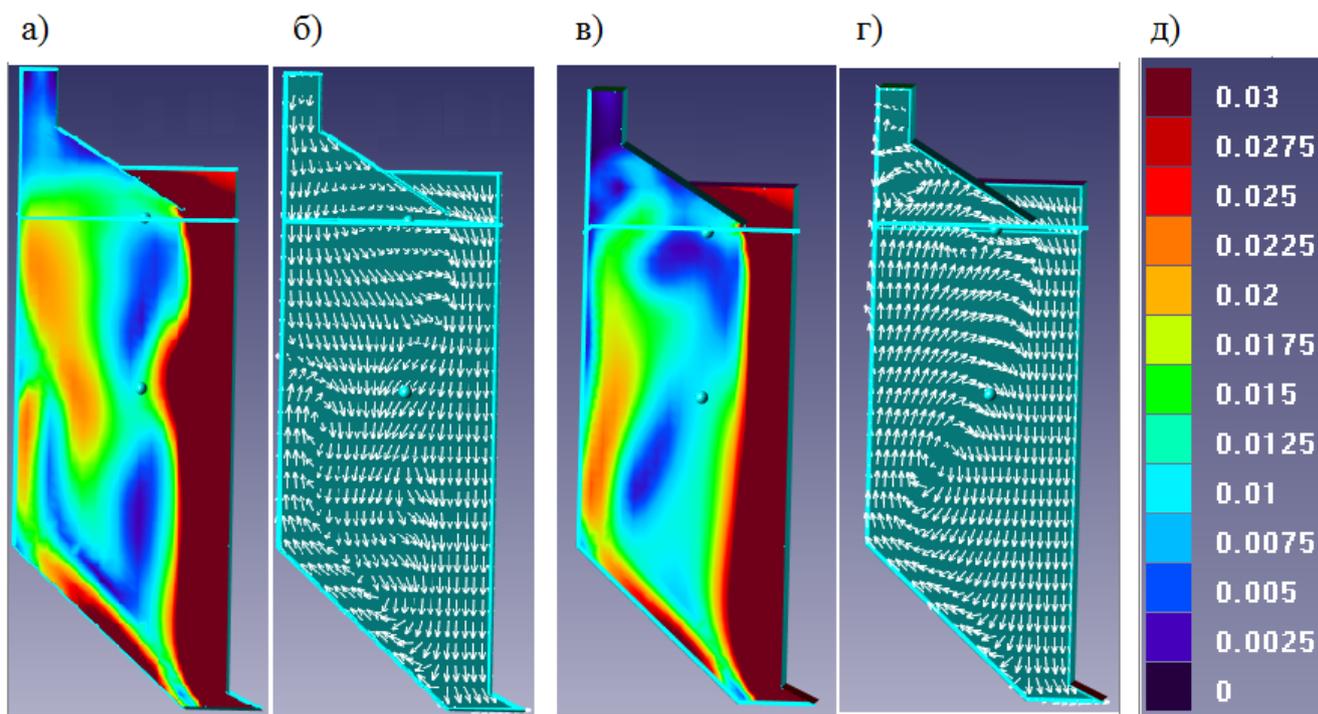


Рисунок 3.5 – Результаты вычислений величин и направлений скорости в плоскости №2 модели эрлифтного биореактора-осветлителя при  $I_{ц} = 200 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ : а – цветовые контуры скоростей при использовании модели KEFV; б – векторы скоростей при использовании модели KEFV; в – векторы скоростей при использовании модели KEFV; г - векторы скоростей при использовании модели KEQ; д – шкала цветового обозначения величин скорости на цветовых контурах, м/с.

При использовании турбулентной модели KEFV наблюдается нисходящий поток в верхней части подкозырьковой области (рисунок 3.5 б). Причём, скорость нисходящего тока под козырьком сопоставима со скоростью восходящего потока водоворотной зоны (рисунок 3.5 а). Экспериментальные наблюдения в целом противоречат таким результатам. При испытании

физической модели эрлифтного биореактора-осветлителя, как с использованием смеси активного ила, так и при испытаниях на чистой воде, нисходящие токи вблизи наружной стенки в зоне осветлителя образуются только при неравномерной работе затопленного эрлифта – если допустить значительную неравномерность нисходящего потока эрлифтного биореактора в пределах сечения между наклонным козырьком и стенкой затопленного эрлифта, чего не должно происходить в идеальной математической модели. Расхождение результатов вычислений и эмпирических наблюдений говорит о нецелесообразности применения данной модели для математического моделирования эрлифтного биореактора-осветлителя.

В случае применения турбулентной модели KEQ получаемые в FlowVision векторы скоростей (рисунок 3.6 в) отражают результаты испытаний физической модели. Нисходящие и восходящие токи в пределах расчётной области разделены условной линией, которая соответствует описанной в теории турбулентных струй границе между затопленной струёй и встречным потоком, который образуется за плохообтекаемым телом.

Таким образом, в результате поисковых теоретических исследований, выявлено, что применение программного комплекса FlowVision для моделирования движения жидкости в эрлифтном биореакторе-осветлителе наиболее целесообразно при использовании квадратичной k-ε модели турбулентности.

Помимо полуэмпирической модели турбулентности, целью поисковых исследований является определение приближённого значения интенсивности турбулентности. В рекомендациях, приведённых в интерфейсе препроцессора FlowVision, считается высокими пределы интенсивности турбулентности 0,05...0,1, однако при таких значениях может происходить существенное занижение отметки условного центра водоворотной зоны (рисунок 3.5 г). На рисунке 3.6 представлен результат вычислений при интенсивности турбулентности 0,1, интенсивности циркуляции  $I_{ц} = 200 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , и гидравлической нагрузке в выходном сечении  $q_r = 1,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  (близкая к

максимальной допустимой гидравлической нагрузке при заданных геометрических параметрах и интенсивности циркуляции по [16]). Размеры расчётной сетки составляют  $X=30$ ,  $Y=80$ ,  $Z=31$  ячеек ( $Y$  – вертикальная ось). На представленном рисунке количество шагов при времени шага 1 с составляет 1000. Аналогичные результаты получены для модели прямоугольного в плане эрлифтного биореактора-осветлителя при времени шага 5 с, ведении расчёта до 3000 шагов и размерах расчётной сетки  $X=22$ ,  $Y=51$ ,  $Z=65$  ячеек.

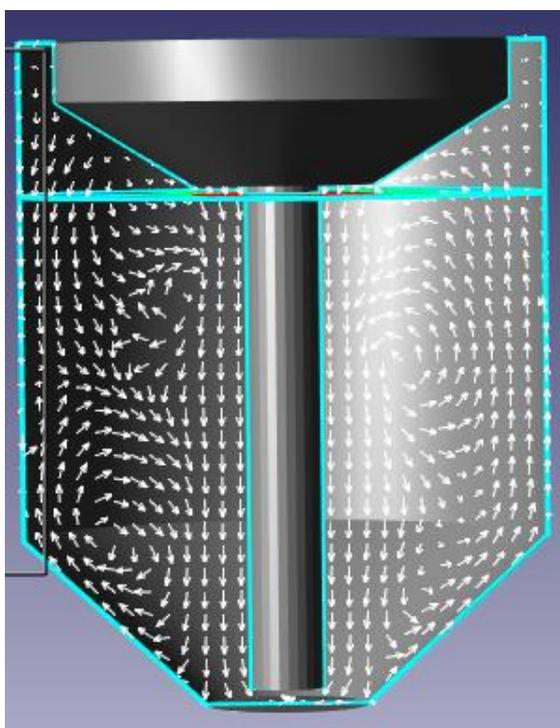


Рисунок 3.6 – Направления движения воды в модели круглого в плане эрлифтного биореактора-осветлителя при интенсивности циркуляции  $I_{ц} = 200 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , интенсивности турбулентности  $I_t = 0,1$  и гидравлической нагрузке в выходном сечении  $q_r = 1,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

Нисходящее движение жидкости в зоне осветлителя, в частности вблизи выходного сечения, не представляется физически возможным при наличии нагрузки на осветлитель, хотя её значение и не велико ( $-0,389 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ) в сравнении с массовой скоростью циркуляционного тока ( $55,6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ). Это резко ставит под сомнение правильность выбора значения интенсивности

турбулентности. Снижение величины интенсивности турбулентности приводит к ещё большему снижению положения водоворотной зоны, а чрезмерное повышение – к увеличению высоты её расположения, что также противоречит результату экспериментов. В результате анализа ряда вычислений получен вывод о том, что, несмотря на достаточно низкие значения критерия  $Re$  нисходящего тока эрлифтного биореактора-осветлителя, интенсивность турбулентности при расчёте гидродинамических параметров эрлифтного биореактора-осветлителя следует принимать около  $I_t \approx 0,5$ .

### **3.3 Сопоставление гидродинамических параметров эрлифтного биореактора-осветлителя, определённых экспериментальным и теоретическими путями**

Для сравнения результатов теоретических расчётов и эмпирических наблюдений сопоставим абсолютные значения скоростей в одинаковых точках геометрической модели, определённые при помощи различных математических моделей. Скорости определяются в точках расчётной области, удалённых от нижней кромки наклонного козырька на расстояния  $x_1, x_2, x_3, x_4$  по горизонтали в сторону удаления от затопленного эрлифта и на расстояния  $y_1, y_2, y_3, y_4$  по вертикали вниз.  $x_1 \equiv 0,2 \cdot X, x_2 \equiv 0,4 \cdot X, x_3 \equiv 0,6 \cdot X, x_4 \equiv 0,8 \cdot X; y_1 \equiv 0,125 \cdot Y, y_2 \equiv 0,25 \cdot Y, y_3 \equiv 0,375 \cdot Y, y_4 \equiv 0,5 \cdot Y$  (рисунок 3.7).

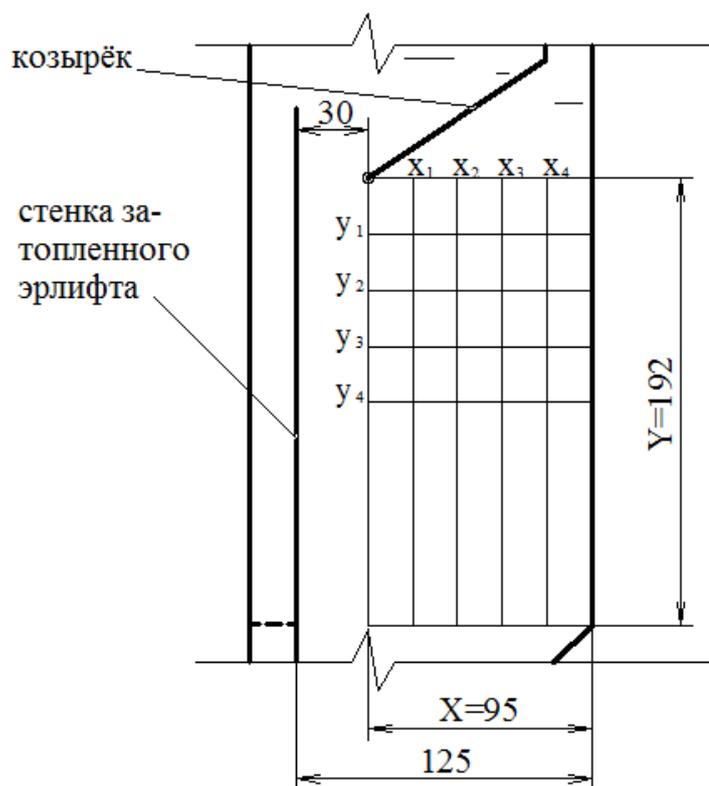


Рисунок 3.7 – Координаты точек сравнения результатов вычисления скорости по различным моделям.

Сравнение производится для интенсивности циркуляции  $I_{ц} = 300 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , для возможности сопоставления с экспериментальными данными, приведёнными во втором разделе работы. Результаты вычислений в программном комплексе FlowVision отображены на рисунке 3.8. Скорости в точках сравнения, определённые при помощи рисунка 3.8, представлены в таблице 3.1 (значения без скобок).

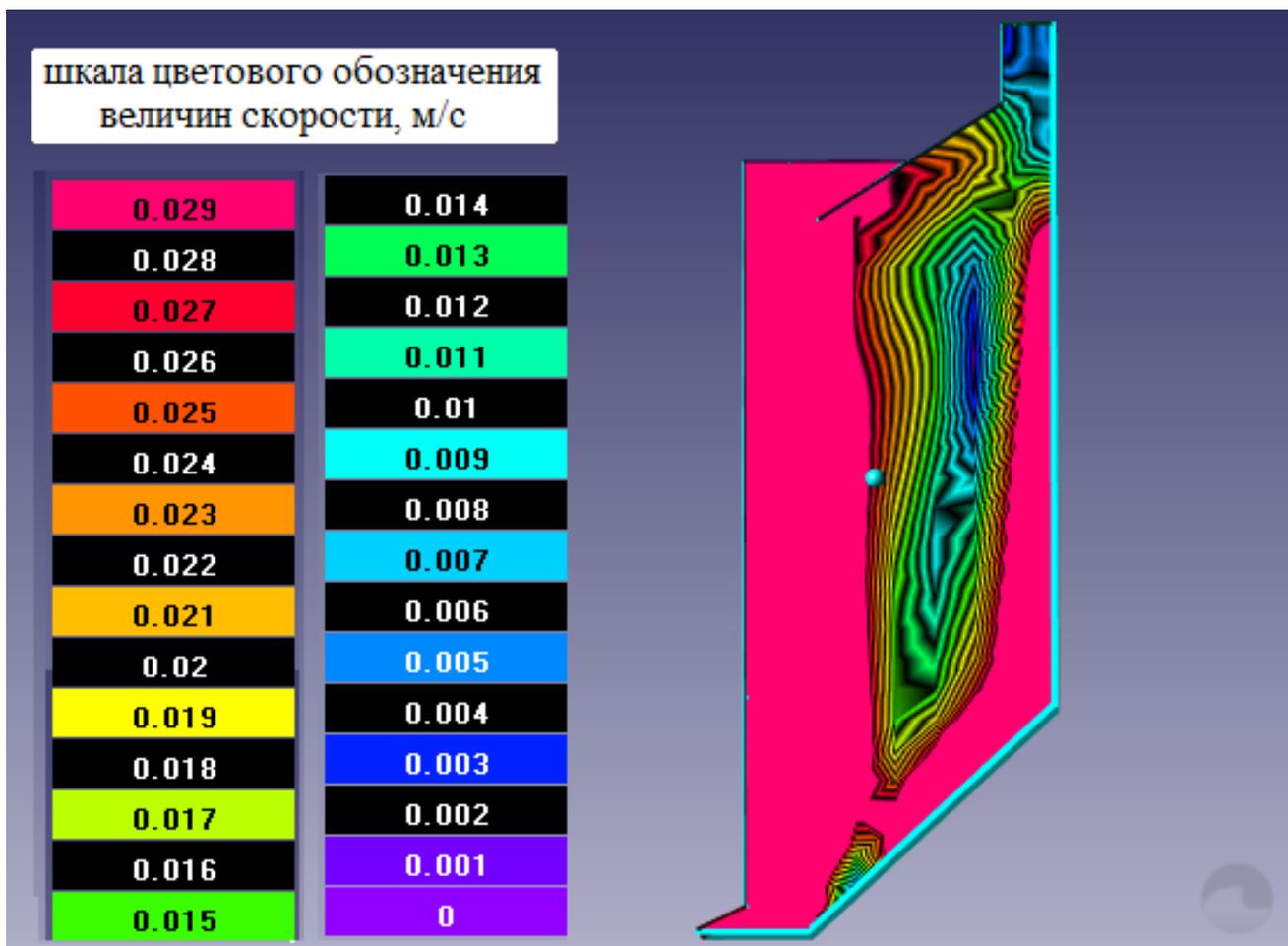


Рисунок 3.8 – Распределение величин скорости воды по вертикальному сечению модели эрлифтного биореактора-осветлителя при  $I_{\text{ц}} = 300 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

В скобках в таблице 3.1 приведены данные, полученные для той же интенсивности циркуляции и тех же координат, но при помощи математической модели, основанной на программе, которая была составлена в среде Delphi на языке Object Pascal и описана в статье «Математическое описание гидродинамических параметров эрлифтного биореактора-осветлителя» [29].

Таблица 3.1 – Численное сравнение результатов моделирования скоростей течения жидкости в эрлифтном биореакторе-осветлителе при использовании различных средств вычислительной гидродинамики

	Величина абсолютной скорости в зависимости от координат, мм/с			
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>
y <sub>1</sub>	29,0 (24,1)	24,5 (25,8)	22,0 (31,7)	20,0 (24,2)
y <sub>2</sub>	26,0 (45,8)	16,0 (62,5)	8,5 (65,0)	16,0 (44,2)
y <sub>3</sub>	27,5 (79,2)	19,0 (85)	7,5 (85)	17,0 (62,5)
y <sub>4</sub>	30,0 (66,7)	18,0 (85)	8,1 (85)	25,0 (58,3)

По результатам экспериментальных исследований физической модели эрлифтного биореактора-осветлителя, описанным во втором разделе диссертации, скорость восходящего потока в осветлителе при интенсивности циркуляции  $I_{ц} = 300 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  должна составлять 21...23 мм/с. Для наблюдаемых в эксперименте частиц скорость определяется главным образом скоростью жидкости в начале потока, которая при изменении скорости жидкости за счёт инерции меняется не сразу. Таким образом можно сделать вывод о том, что расчёт гидродинамических параметров эрлифтных биореакторов-осветлителей в программном комплексе FlowVision соответствует их действительным значениям.

Данные, полученные при помощи программного комплекса FlowVision и по математической модели, которая основана на теории турбулентных струй, приведены для сопоставления в таблице 3.2. Сравнение производится для интенсивности циркуляции  $I_{ц} = 100 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Нагрузка на осветлитель нулевая. Результаты вычислений в программном комплексе FlowVision

определены при интенсивности турбулентности  $I_t = 0,5$  и массовой скорости во входном сечении (см. рисунок 3.4) равной  $12,3 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , что соответствует  $0,0278 \text{ м}/\text{с}$  в зазоре между наклонным козырьком и стенкой затопленного эрлифта. Графическое отображение результатов вычислений приведено на рисунке 3.9. Расчёты по математической модели, которая базируется на теории турбулентных струй, произведены по формуле (1.13), с использованием программы Mathcad Application.

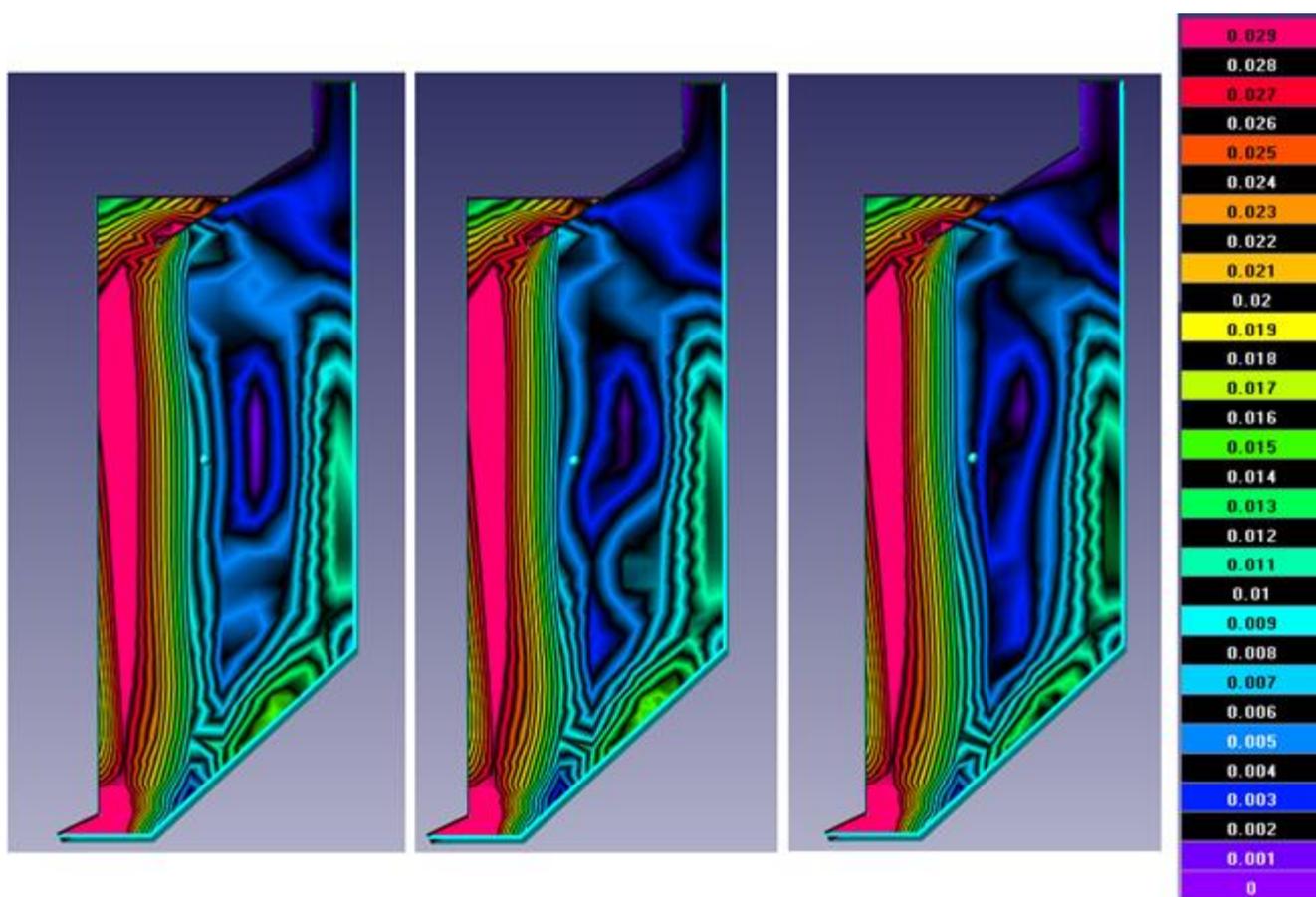


Рисунок 3.9 – Распределение величин скорости воды, м/с, по вертикальному сечению модели эрлифтного биореактора-осветлителя при  $I_{ц} = 100 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

Таблица 3.2 – Сравнение скоростей восходящего потока в осветлителе, рассчитанным в программном комплексе FlowVision и по математической модели, основанной на теории турбулентных струй, при  $I_{ц} = 100 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

Глубина $u$ , мм расчётного сечения относительно низа наклонного козырька	Величина скорости восходящего потока в осветлителе, мм/с	
	теория затопленных турбулентных струй	программный комплекс FlowVision
0	0	2
20	7,7	5
40	15	7
60	23	9
80	31	10
100	39	11
120	47	11,5
140	55	12
160	63	11,5
180	71	9

В целом, обе математические модели, данные которых представлены в таблице 3.2, свидетельствует о постепенном падении скорости по мере движения восходящего потока в осветлителе. Вывод о том, что параметры, вычисленные по полуэмпирической модели турбулентности KEQ, являются более достоверными, чем результаты вычислений эмпирической модели, основанной на теории затопленных турбулентных струй можно сделать на основании следующих моментов:

- вычисления по полуэмпирической модели турбулентности KEQ учитывают движение жидкости над уровнем низа наклонного козырька;
- большую часть протяжённости исследуемого восходящего потока его скорость по основанной на теории турбулентных струй математической

модели превышает максимальную скорость нисходящего потока эрлифтного биореактора, что вызывает сомнения;

- величины скорости, определённые при помощи программного комплекса FlowVision близки к определённым в результате экспериментальных исследований.

### **3.4 Вычисление гидродинамических параметров эрлифтных биореакторов-осветлителей круглой в плане формы**

В данном разделе, в соответствии с задачами диссертационной работы, представлено сравнение результатов вычислений для геометрической модели, соответствующей исследованной физической модели эрлифтного биореактора-осветлителя, и для геометрической модели такого эрлифтного биореактора-осветлителя, которая может иметь практическую ценность, но не подвергалась экспериментальным исследованиям. В качестве ранее экспериментально не исследованного эрлифтного биореактора-осветлителя принят эрлифтный биореактор-осветлитель круглой в плане формы – такие биологические реакторы описывались теоретически и сооружались для практического использования в системах очистки сточных вод [25], однако свидетельства экспериментальных исследований круглых в плане эрлифтных биореакторов-осветлителей отсутствуют в литературных источниках.

Согласно математической модели, основанной на теории турбулентных струй, основные данные о которой представлены в подразделе 1.4 данной диссертационной работы, скорости восходящего потока в осветлителях прямоугольных и круглых в плане эрлифтных биореакторов-осветлителей следует рассчитывать по формуле (1.13) или по формуле (1.14), соответственно. В таблице 3.3 представлены результаты расчётов скорости восходящих потоков в осветлителях в зависимости от глубины относительно низа наклонного козырька в прямоугольных и круглых в плане эрлифтных биореакторах-осветлителях, вычисленные по основанной на теории

турбулентных струй математической модели при интенсивностях циркуляции  $I_{ц} = 300 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

Таблица 3.3 – Сравнение скоростей восходящего потока в осветлителе прямоугольных и круглых в плане эрлифтных биореакторов-осветлителей при  $I_{ц} = 300 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

Глубина $y$ , мм расчётного сечения относительно низа наклонного козырька	Величина скорости восходящего потока в осветлителе, мм/с		Соотношение $v_{п}/v_{к}$
	при прямоугольной в плане форме $v_{п}$	при круглой в плане форме $v_{к}$	
80	0,222	-0,021	-10,4
100	0,278	0,005	60,1
120	0,334	0,038	8,70
140	0,391	0,079	4,97
160	0,448	0,174	3,60

Приведённые в таблице 3.3 данные говорят о том, что в круглых в плане эрлифтных биореакторах-осветлителях, по сравнению с прямоугольными в плане, возникают заметно менее интенсивные восходящие потоки, служащие для поддержания взвешенного слоя. Кроме того, в верхней части осветлителя предполагается нисходящее течение жидкости. Это говорит о возможности (необходимости) создавать в круглых в плане эрлифтных биореакторах-осветлителях более интенсивную циркуляцию в эрлифтном биореакторе, чем допускается (требуется) в эрлифтных биореакторах-осветлителях прямоугольной в плане формы. Для получения более конкретных данных производятся расчёты в программном комплексе FlowVision.

Геометрическая модель круглого в плане эрлифтного биореактора-осветлителя, созданная на основании представленной на рисунке 3.3 3D-модели, в программном комплексе FlowVision включает в себя: поверхности твёрдых стенок (рисунок 3.9 а); сечение входа нисходящего потока эрлифтного биореактора (рисунок 3.9 б), в которой задаётся значение скорости

и пульсаций входящего в расчётную область потока жидкости; в – сечение выхода восходящего потока очищенной жидкости (рисунок 3.9 в), при помощи которого можно задавать гидравлическую нагрузку на осветлитель; г – сечение свободного выхода жидкости из расчётной области в затопленный эрлифт (рисунок 3.9 г), позволяющее соблюсти баланс объёмного расхода жидкости в расчётной области при любых исходных параметрах.

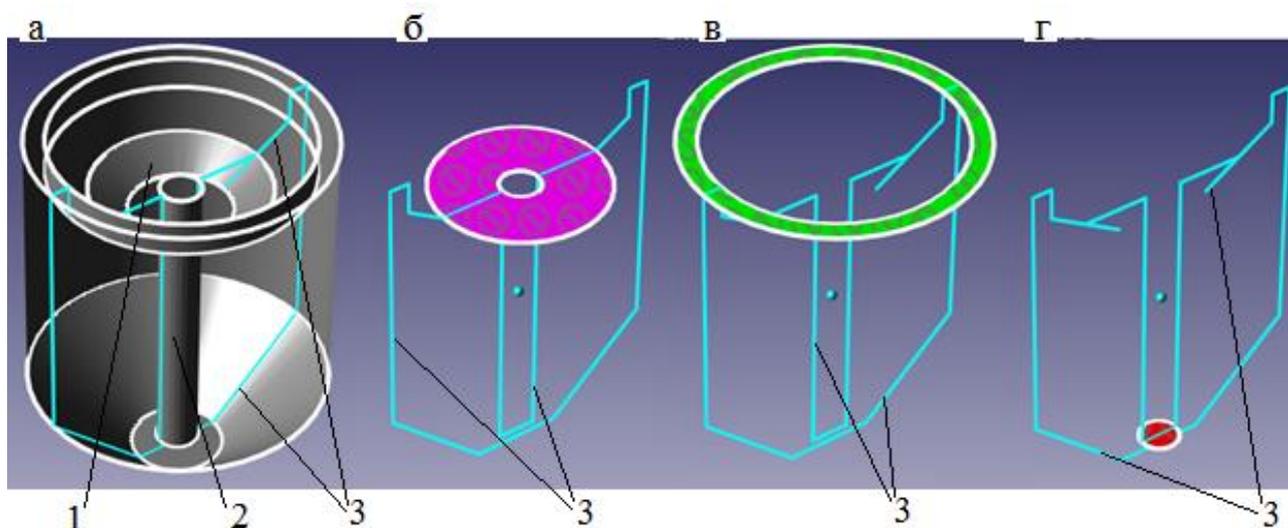


Рисунок 3.9 - Геометрическая модель круглого в плане эрлифтного биореактора-осветлителя в программном комплексе FlowVision: а – поверхности твёрдых стенок; б – сечение входа нисходящего потока эрлифтного биореактора; в – сечение выхода восходящего потока очищенной жидкости; г – сечение свободного выхода жидкости из расчётной области в затопленный эрлифт

1 – верхняя поверхность наклонного козырька; 2 – стенки затопленного эрлифта; 3 – плоскость контроля гидродинамических параметров.

Расчёт круглых в плане эрлифтных биореакторов-осветлителей в солвере программного комплекса FlowVision оказывается более длительным, чем расчёт прямоугольных в плане эрлифтных биореакторов-осветлителей тех же размеров. Кроме того, в прямоугольных в плане моделях результаты вычислений оказываются более стабильными при сравнении различных шагов по мере протекания итераций. Определения интенсивностей циркуляции, которые приведут к образованию сходственных гидродинамических

параметров осветителей в биологических реакторах-осветителях круглой и прямоугольной в плане формы, определяется следующим путём:

1. В программном комплексе FlowVision вычисляются скорости в модели круглого в плане эрлифтного биореактора-осветителя, которая представлена на рисунке 3.9. Величины скорости контролируются в двух взаимоперпендикулярных вертикальных плоскостях.

2. Выполняются расчёты в программном комплексе FlowVision гидродинамических параметров модели прямоугольного в плане эрлифтного биореактора-осветителя, которая представлена на рисунке 3.4. Расчёты выполняются при более низких значениях интенсивности циркуляции  $I_{ц}$ , чем значение  $I_{ц}$ , при котором рассчитывались параметры модели круглого в плане эрлифтного биореактора-осветителя.

3. В результате анализа расчётов гидродинамических параметров моделей определяется соотношение интенсивностей циркуляции  $I_{ц}$  в прямоугольных и круглых в плане эрлифтных биореакторах-осветителях, которые приводят к образованию сходственных восходящих токов в осветителе.

На рисунке 3.10 представлены результаты вычислений в программном комплексе FlowVision скоростей по двум взаимоперпендикулярным плоскостям расчётной области круглого в плане эрлифтного биологического реактора-осветителя при интенсивности циркуляции  $I_{ц} = 400 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , т.е. при массовой скорости в сечения входа нисходящего потока эрлифтного биореактора (см. рисунок 3.9 в) в расчётную область задаётся  $21,9 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Шкала цветового обозначения величин скорости приведена на рисунке 3.8. Интенсивность турбулентности принята  $I_t = 0,5$ . Масштаб турбулентности назначен  $0,0475$  – из расчёта равенства максимального размера вихря ширине подкозырьковой зоны экспериментальной модели эрлифтного биореактора-осветителя ( $0,095 \text{ м}$ ) и принятой интенсивности турбулентности. Отсутствует нагрузка на осветитель - скорость воды в сечении выхода очищенной жидкости (см. рисунок 3.9 в) задана равной  $0$ . Размеры расчётной сетки

приняты  $X=18$ ,  $Y=30$  и  $Z=12$  ячеек, поскольку большое число ячеек приводит к увеличению количества завихрений, которое существенно затрудняет определение осреднённых величин скорости.

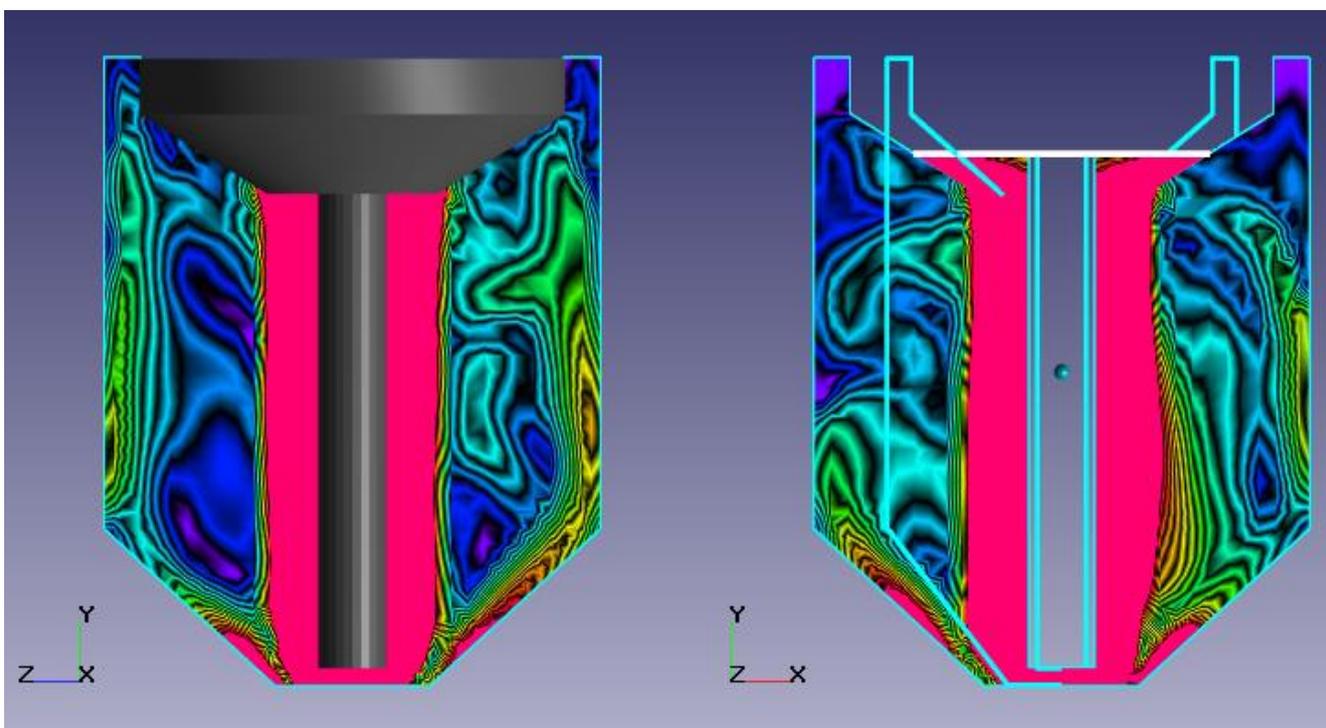


Рисунок 3.10 - Результаты вычислений скоростей по двум взаимоперпендикулярным плоскостям расчётной области круглого в плане эрлифтного биологического реактора-осветлителя в программном комплексе FlowVision при интенсивности циркуляции  $I_{ц} = 400 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

На рисунке 3.11 представлены аналогичные данные при интенсивности циркуляции  $I_{ц} = 600 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

Максимальная скорость  $v$  восходящего потока в осветлителе, определяемая как среднее значение среди наблюдаемых скоростей в плоскостях перпендикулярных к осям  $X$  и  $Z$ , слева и справа от вертикальной оси симметрии, в горизонтальном сечении при  $y_4 = 0,5 \cdot Y$  (см. рисунок 3.7) составила:

-  $v_k = 12 \text{ мм/с}$  (по величинам 19, 15, 17 и -5 мм/с скоростей потоков, наблюдаемых на рисунке 3.10) при интенсивности циркуляции в биологическом реакторе  $I_{ц} = 400 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;

-  $v_k = 17$  мм/с (по величинам 21, 19, 11 и 18 мм/с скоростей потоков, наблюдаемых на рисунке 3.10) при интенсивности циркуляции в биологическом реакторе  $I_{ц} = 600$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч).

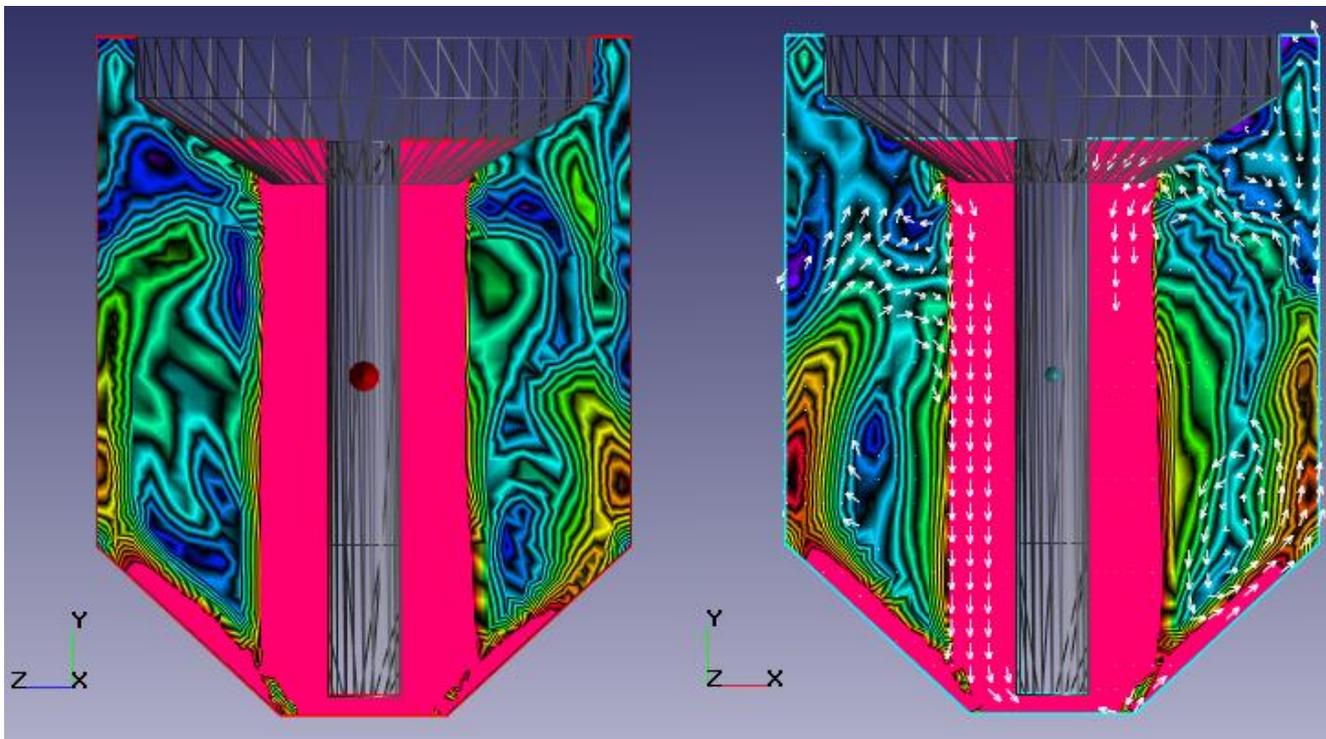


Рисунок 3.11 - Результаты вычислений скоростей по двум взаимоперпендикулярным плоскостям расчётной области круглого в плане эрлифтного биологического реактора-осветлителя в программном комплексе FlowVision при интенсивности циркуляции  $I_{ц} = 600$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч)

Производим поиск такой интенсивности циркуляции в прямоугольном в плане биореакторе-осветлителе, которая бы приводила к поддержанию в нём восходящих потоков в осветлителе, максимально близких по скоростным характеристикам с восходящими потоками осветлителя круглого в плане биореактора-осветлителя, работающего при  $I_{ц} = 400$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч):

- при интенсивности циркуляции в прямоугольном в плане биореакторе-осветлителе  $I_{ц} = 300$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч) наблюдаются более интенсивные скорости восходящих потоков в осветлителе (см. рисунки 3.8):

- при интенсивности циркуляции  $I_{ц} = 100$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч) максимальная скорость в восходящем потоке осветлителя при  $y_4 \approx 0,5 \cdot Y$  оказывается  $v_{п} = 10$

мм/с (рисунок 3.9), что меньше скорости в сходственных точках круглого в плане эрлифтного биореактора-осветлителя;

- при интенсивности циркуляции  $I_{ц} = 200 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  скорость в восходящем потоке осветлителя составляет  $v_{п} = 26 \text{ мм/с}$  (рисунок 3.12 а);

- при интенсивности циркуляции  $I_{ц} = 130 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  скорость в восходящем потоке осветлителя составляет  $v_{п} = 13 \text{ мм/с}$  (рисунок 3.12 б);

- при интенсивности циркуляции  $I_{ц} = 120 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  скорость в восходящем потоке осветлителя составляет  $v_{п} = 12 \text{ мм/с}$  (рисунок 3.12 в).

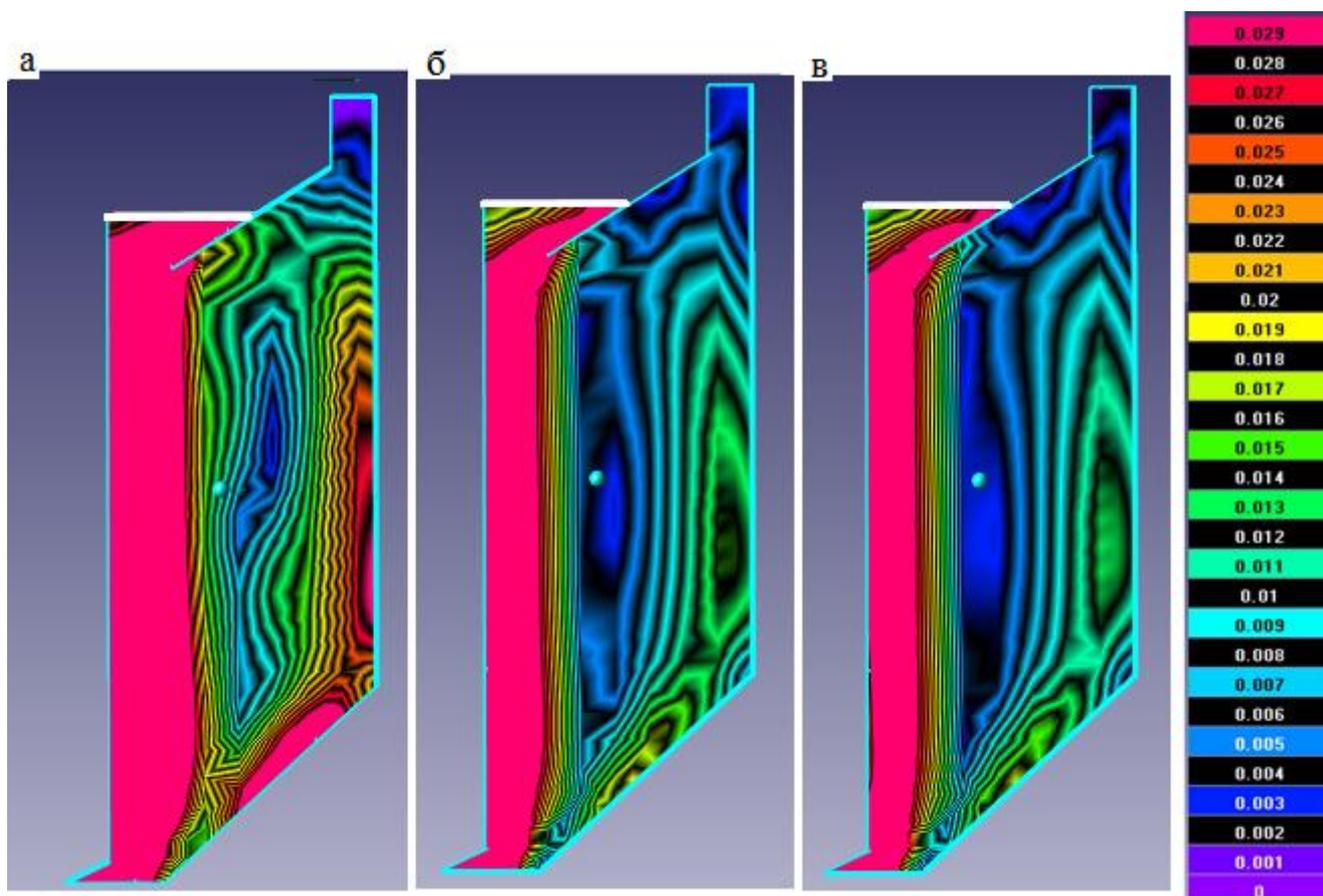


Рисунок 3.12 – Распределение величин скорости воды, м/с, по вертикальному сечению прямоугольного в плане эрлифтного биореактора-осветлителя: а – при  $I_{ц} = 200 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; б – при  $I_{ц} = 130 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; в – при  $I_{ц} = 120 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

Производим аналогичный поиск интенсивности циркуляции в прямоугольном в плане биореакторе-осветлителе, которая бы с точки зрения способствования образованию восходящего потока в осветлителе

соответствовала интенсивности циркуляции  $I_{ц} = 600 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  в круглом в плане эрлифтном биореакторе осветлителе:

- ранее выяснено, что при интенсивности циркуляции в прямоугольном в плане биореакторе-осветлителе  $I_{ц} = 200 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  наблюдаются слишком интенсивные скорости восходящих потоков в осветлителе (см. рисунки 3.12 а), а при интенсивности  $I_{ц} = 130 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  скорости восходящего потока в осветлителе прямоугольного в плане эрлифтного биореактора-осветлителя (см. рисунок 3.12 б) не достигают аналогичных скоростей при интенсивности  $I_{ц} = 600 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  в круглом (рисунок 3.11);

- при интенсивности циркуляции  $I_{ц} = 170 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  максимальная скорость в восходящем потоке осветлителя при  $y_{4\equiv} = 0,5 \cdot Y$  оказывается  $v_{п} = 22 \text{ мм/с}$  (см. рисунок 3.13 а), что больше скорости в сходственных точках круглого в плане эрлифтного биореактора-осветлителя;

- при интенсивности циркуляции  $I_{ц} = 155 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  скорость в восходящем потоке осветлителя составляет  $v_{п} = 19 \text{ мм/с}$  (рисунок 3.13 б);

- при интенсивности циркуляции  $I_{ц} = 150 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  скорость в восходящем потоке осветлителя составляет  $v_{п} = 17 \text{ мм/с}$  (рисунок 3.12 в).

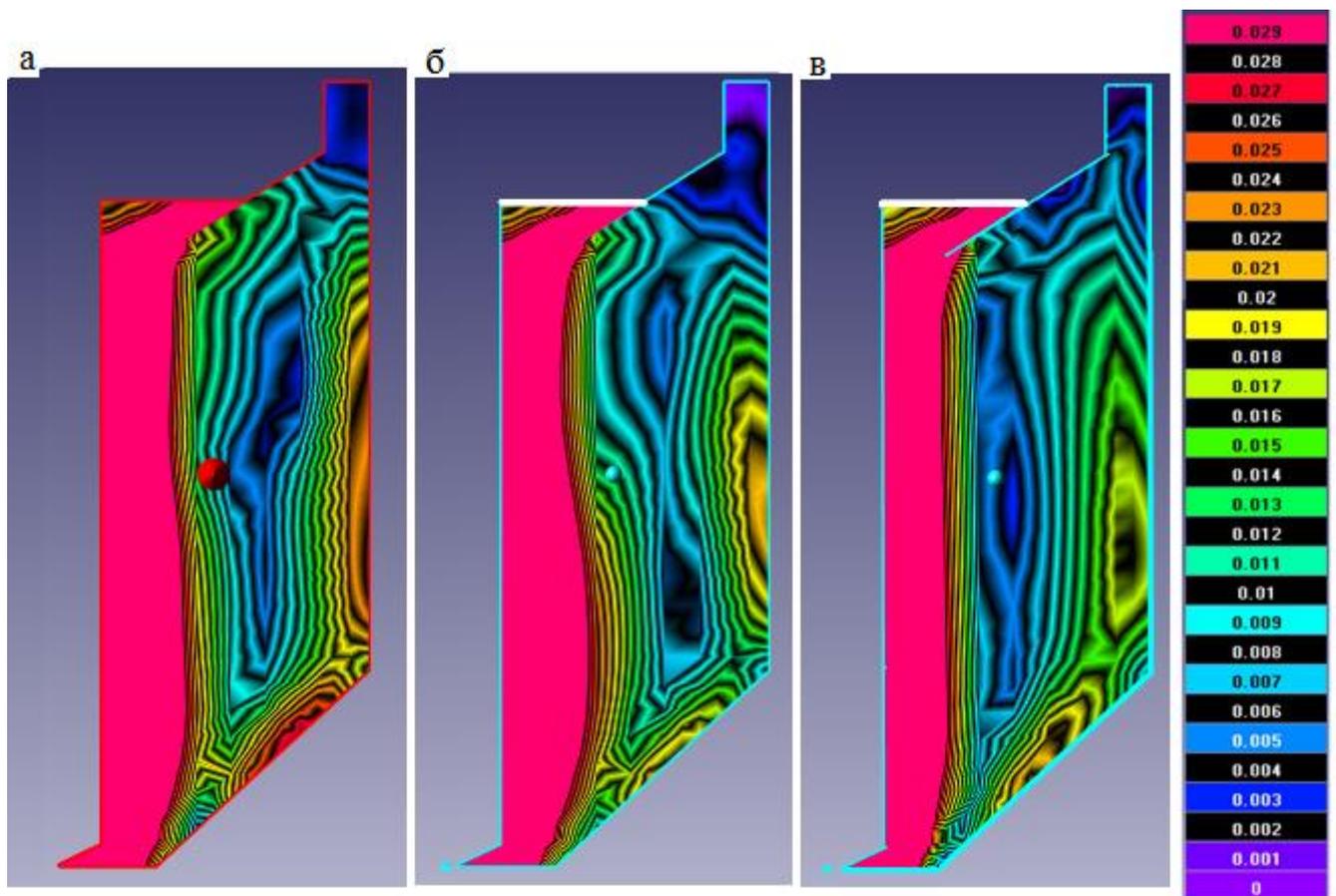


Рисунок 3.13 – Распределение величин скорости воды, м/с, по вертикальному сечению прямоугольного в плане эрлифтного биореактора-осветлителя: а – при  $I_{ц} = 170 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; б – при  $I_{ц} = 155 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; в – при  $I_{ц} = 150 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

По результатам расчётов получается, что при интенсивности циркуляции в круглом в плане эрлифтном биореакторе-осветлителе  $I_{ц} = 400 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , с точки зрения инициирования восходящего потока в осветлителе, она (при прочих равных параметрах) должна превышает интенсивность циркуляции в прямоугольном в плане эрлифтном биореакторе-осветлителе в  $400/120 = 3,33$  раз. При интенсивности циркуляции в круглом в плане эрлифтном биореакторе-осветлителе  $I_{ц} = 600 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  – в  $600/150 = 4,0$  раз. Вероятнее всего, в эрлифтных биореакторах-осветлителях, имеющих круглую в плане форму, на превышение требуемой (допустимой) интенсивности циркуляции относительно требуемой (допустимой) интенсивности циркуляции в эрлифтных биореакторах-осветлителях, которые имеют круглую в плане форму, влияют и геометрические параметры: отношение

условной ширины осветлителя  $B_c$  к радиусу затопленного эрлифта, радиусу сооружения, высоте биореактора-осветлителя. Требуемая интенсивность циркуляции в имеющем круглую в плане форму эрлифтном биореакторе-осветлителе должна в 3...4 раза превышать требуемую интенсивность циркуляции в прямоугольных сооружениях со сходными геометрическими параметрами и гидравлической нагрузкой на осветлитель. При этом для получения достоверных зависимостей, позволяющих на стадии проектирования определять допустимую интенсивность циркуляции  $I_{ц}$  в имеющем круглую в плане форму эрлифтном биореакторе-осветлителе, необходимы дальнейшие исследования, включающие экспериментальные испытания физических моделей круглых в плане эрлифтных биореакторов-осветлителей.

### 3.5 Выводы к разделу 3

1. Наиболее точно параметры водоворотной зоны эрлифтного биореактора-осветлителя характеризует квадратичная  $k$ - $\varepsilon$  полуэмпирическая модель турбулентности.

2. Вычисления гидродинамических параметров токов эрлифтных биореакторов-осветлителей при помощи программного комплекса FlowVision позволяют получить более точные и достоверные результаты, чем другие существующие на данный момент математические модели, описывающие гидродинамику данного сооружения биологической очистки сточных вод.

3. Требуемая интенсивность циркуляции  $I_{ц}$  в имеющем круглую в плане форму эрлифтном биореакторе-осветлителе должна в 3...4 раза превышать требуемую интенсивность циркуляции в прямоугольных в плане эрлифтных биореакторах-осветлителях, имеющих сходственные геометрические параметры и такую же гидравлическую нагрузку на осветлитель. При этом для получения достоверных зависимостей, позволяющих на стадии проектирования определять допустимую интенсивность циркуляции в зависимости от геометрических параметров и гидравлической нагрузки,

необходимы дальнейшие исследования, включающие экспериментальные испытания физических моделей круглых в плане эрлифтных биореакторов-осветлителей.

4. Использование FlowVision позволило получить полезные результаты в исследовании гидродинамических параметров эрлифтных биореакторов-осветлителей даже при частичном понимании законов вычислительной гидродинамики и далеко неполном использовании более широких возможностей программного комплекса. Это говорит о перспективности применения программного комплекса FlowVision в теоретическом изучении гидро-, аэро- и термодинамических процессов различных объектов.

#### **Список литературы, на которую приводятся ссылки в подразделах 3.2-3.5**

16. Нездойминов, В.И. Исследование допустимой подачи затопленной эрлифтной системы аэрации в аэротенке-осветлителе / В.И. Нездойминов, Д.В. Заворотный, В.С. Рожков – Текст: электронный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2017. – №3 (125). – С. 80-85. - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30317130>

25. Заворотный, Д.В. Совершенствование илоотделения в аэротенках-осветлителях с затопленной эрлифтной системой аэрации : автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. : спец. 05.23.04 (водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов) / Заворотный Дмитрий Викторович ; Мин-во образования и науки Донецкой Народной Республики. ГОУ ВПО ДонНАСА. – Макеевка, 2019. – 20 с. : ил., табл., граф.

29. Математическое описание гидродинамических параметров эрлифтного биореактора-осветлителя / В.И. Нездойминов, Н.Н. Голоденко, Д.В. Заворотный, О.В. Майстренко. – Текст: непосредственный // Вестник Донецкого национального университета. Сер. Г: Технические науки. – 2020. – №1. – С. 84-96.

45. Субботина, П.М. Применение различных моделей турбулентности для задач внешнего обтекания в программном комплексе FlowVision / П.М. Субботина, А.С. Шишаева. – Текст: электронный // Современные технологии – в промышленность. – 8 с. – URL: [https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv\\_es08\\_turbul.pdf](https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv_es08_turbul.pdf)