

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
А К Ц И О Н Е Р Н О Е О Б Щ Е С Т В О
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ —
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени А.И. Лейпунского

ФЭИ-3316

В. Н. Дельнов, Р. И. Мухамадеев, А. И. Патракеева

**РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ
В СИММЕТРИЧНОЙ ПЛОСКОЙ НАПОРНОЙ КАМЕРЕ
С ДВУМЯ ПОДВОДЯЩИМИ И ДВУМЯ ОТВОДЯЩИМИ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ КАНАЛАМИ**

Обнинск – 2025

Дельнов В. Н., Мухамадеев Р. И., Патракеева А. И. Расчетное исследование течения жидкости в симметричной плоской напорной камере с двумя подводящими и двумя отводящими цилиндрическими каналами: Препринт ФЭИ-3316. — Обнинск, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 2025. — 20 с.

Ключевые слова: гидродинамика, проточная часть, напорная камера, расчетное исследование, характер течения.

Предмет исследования – гидродинамика проточной части симметричной плоской напорной камеры с двумя подводящими и двумя отводящими цилиндрическими каналами.

Цель работы – определение характера течения жидкости в напорной камере при различных параметрах набегающего на отводящие каналы потока жидкости.

Расчетные данные получены при определенном диапазоне соотношения размеров плоской напорной камеры, турбулентном течении жидкости в напорной камере и идентичном массовом расходе жидкости через нее.

Практическая значимость работы состоит в получении расчетных данных по течению жидкости при различных параметрах набегающего на отводящие каналы потока жидкости.

Установлена степень влияния условий подвода жидкости из подводящих каналов в напорную камеру на характер течения жидкости в ней при постоянном массовом расходе жидкости через напорную камеру и турбулентном течении жидкости.

Результаты расчетов имеют практическую и научную ценность, отвечают актуальным потребностям атомной отрасли. Использование результатов позволит повысить эффективность и надежность работы реакторов и теплообменников ядерных энергетических установок.

The subject of the study is hydrodynamics of the flow part of a symmetrical flat pressure chamber with fluid removal through two adjacent outlet cylindrical channels.

The purpose of the study is to determine hydrodynamic characteristics of the flow part in a flat-type pressure chamber and to identify regularities in the change of the hydraulic resistance coefficients of the outlet channels at various parameters of the fluid flow entering them.

The experimental data were obtained within a certain range of the ratio of flat pressure chamber dimensions, with a turbulent flow motion in the pressure chamber and an identical rate of mass flow through it.

A semi-empirical relationship is given for the determination of the ratio of mass flow rates in the outlet channels depending on the ratio of mass flow rates in the inlet channels for different designs of inserts in the outlet channels.

A previously unknown regularity has been established for the change in the hydraulic resistance coefficients of the adjacent outlet channels connected to the pressure chamber when the parameters of the fluid flow entering the outlet channels change.

The practical significance of the study consists in obtaining experimental data on the coefficients of hydraulic resistance of isolated flow-metering channels and adjacent outlet channels, mass flow rates in the inlet and outlet channels and in the determination of the regularity of these coefficients' change depending on the parameters of the fluid flow entering the outlet channels.

The presented data on the pressure chamber hydrodynamics can be used in the technical calculations of the pressure chambers of this type as applied to heat exchange equipment of nuclear power plants.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Аналитический обзор по исследованиям гидродинамики напорной камеры.....	5
2. Описание исследуемой напорной камеры	7
3. Методика проведения расчетного исследования течения жидкости в напорной камере	8
4. Результаты расчетного исследования течения жидкости в напорной камере.....	9
Заключение	18
Список литературы.....	18

ВВЕДЕНИЕ

Напорные камеры занимают важное место в проточных частях теплообменников и реакторов ядерных энергетических установок, широко применяются в энергетике, химической промышленности, системах водоснабжения и других отраслях.

Напорные камеры играют значительную роль в обеспечении эффективного и контролируемого движения сред в различных технических и технологических процессах.

Использование достоверных данных о гидродинамике проточных частей напорных камер при их проектировании напрямую влияет на работоспособность, надёжность, безопасность и экономичность систем, в которых они используются.

Симметричные плоские напорные камеры с торцевым подводом и двумя отводящими цилиндрическими каналами представляют особый интерес в гидродинамике из-за специфических особенностей течения в них. В таких камерах возникают сложные потоки с областями разделения и объединения, меняющимися скоростями и давлениями. Понимание этих процессов важно для оптимизации конструкций напорных камер, повышения эффективности их работы и предотвращения возможных аварийных ситуаций.

Актуальность исследования обусловлена потребностью в улучшении методов расчета и проектирования напорных камер.

Результаты работы могут быть применены при разработке новых технических решений, использующих системы для распределения жидкостей и газов.

В настоящее время существует значительный объем работ, посвященных исследованию гидродинамики различных типов напорных камер. Однако большинство исследований концентрируется на напорных камерах с множеством отводов или асимметричным распределением потоков. Гидродинамика симметричных плоских напорных камер с подводом потока на два отводящих канала изучена недостаточно. Это создает определенные трудности при их проектировании и оптимизации, так как отсутствуют надежные данные о поведении потоков в таких системах и влиянии геометрических и режимных параметров на гидродинамические характеристики.

Предмет исследования — гидродинамика проточной части симметричной плоской напорной камеры с двумя подводящими и двумя отводящими цилиндрическими каналами.

Целью работы является определение влияния конструктивных характеристик входных и выходных каналов коллекторных систем и их гидродинамических характеристик на гидродинамику выходных каналов при постоянном массовом расходе через плоскую напорную камеру с двумя подводящими и двумя отводящими цилиндрическими каналами.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ существующих исследований и методов расчета течения жидкости в проточной части напорной камеры;
- провести серию расчетов течения жидкости в напорной камере при различных соотношениях массового расхода жидкости в подводящих каналах при постоянном массовом расходе через напорную камеру и турбулентном течении жидкости в ней;
- проанализировать результаты расчетов и выявить характерные схемы течения жидкости в напорной камере при различных соотношениях массового расхода жидкости в подводящих каналах.

Результаты расчетов имеют практическую и научную ценность, отвечают актуальным потребностям атомной отрасли. Использование результатов позволит повысить эффективность и надежность работы реакторов и теплообменников ядерных энергетических установок.

1. Аналитический обзор по исследованиям гидродинамики напорной камеры

Гидродинамика напорной камеры — это важное направление исследований, связанное с анализом и оптимизацией потоков теплоносителей, рабочих сред и жидкостей в трубопроводах и коллекторах различного технического оборудования.

Результаты основополагающих работ по теории турбулентных струй даны в работах [1], [2].

В настоящее время активно ведутся исследования гидродинамики различных типов коллекторных систем, в том числе, напорных камер, раздающих и собирающих коллекторных систем ЯЭУ и теплообменников [5], [6], [9], [20].

В последние годы наблюдается значительный прогресс в исследованиях гидродинамики напорных камер, обусловленный развитием вычислительных технологий, материаловедения и новых методов экспериментального анализа.

С развитием вычислительных мощностей стали широко применяться методы вычислительной гидродинамики (CFD) для моделирования потоков в сложных геометриях напорных камер. Эти модели позволяют:

- анализировать трехмерные течения, учитывая сложную конфигурацию каналов и взаимодействие потоков;
- оптимизировать геометрию систем для достижения равномерного распределения потока и минимизации потерь давления;
- изучать нестационарные явления, такие как пульсации давления и образование вихрей, влияющих на надежность системы.

Большинство гидродинамических расчетов напорных камер связано с исследованием течения жидкости в каналах. Одной из задач данных расчетов является определение характера течения при различных геометрических

параметрах напорной камеры, режимах течения жидкости в них и условиях подвода потока в напорную камеру.

В [9] рассматриваются вопросы распределения расхода теплоносителя по каналам П-образного и Z-образного коллекторов. При этом распределение теплоносителя по каналам реактора осуществляется из общего входного (раздающего) коллектора, имеющего вид осесимметричной камеры с боковым подводом теплоносителя. Во входном коллекторе теплоноситель движется с отбором расхода по пути в каналы, а в выходном коллекторе движение теплоносителя происходит с присоединением расхода по пути из каналов.

Гидравлическое профилирование потока путём установки диффузора на входе в топливную кассету рассмотрено в работе [11]. В диффузоре, установленном на входе в кассету, имеет место течение типа затопленной струи в ограниченном объеме. Авторы приводят зависимости распределения скорости потока на входе в кассету по её радиусу от гидравлического сопротивления диффузора.

Одним из направлений исследований гидродинамики напорных камер являются исследования струйного течения. Течение в рабочем объеме напорной камеры носит струйный характер. Теория распространения турбулентных струй приводится в работах [2], [21], где также рассматриваются системы плоских параллельных струй.

Взаимодействие двух плоских параллельно истекающих струй также рассмотрено в работе [3]. Отмечено, что задача о взаимодействии двух одинаковых плоских струй (до точки застоя) эквивалентна задаче о присоединении одиночной струи к близлежащей стенке. Предложена модель для расчета взаимодействия двух плоских турбулентных параллельно истекающих струй при несимметричных условиях на входе.

В работе [2] рассматривается течение жидкости в канале за плохообтекаемым телом. Рассмотрены области обратных токов, создаваемые с помощью завихрителей или плохообтекаемых тел или возникающие при отрыве потока от стенок канала, и приведены схемы подобных течений, где оно разделено на три зоны по характеру течения. В работе [2] приведены результаты исследования осесимметричного течения, образованного струей, входящей в тупик.

Для раздающих коллекторных систем (далее — РКС) с центральным подводом и боковым отводом жидкости характерны сложный характер течения жидкости, наличие струйного течения, вихревых и застойных зон, течение жидкости вдоль решеток с раздачей потока по ее каналам и неравномерный профиль массового расхода (средней скорости) в трубном пучке. Гидродинамика проточной части РКС в существенной мере зависит от конструкции коллектора.

В работе [8] представлены результаты экспериментального исследования на гидродатчике течения жидкости в проточной части РКС второго контура промежуточного теплообменника реакторной установки типа БН.

В работе [23] представлены результаты расчетного исследования распределения жидкости за выравнивающей решеткой.

Схемы течения теплоносителя в РКС различного типа представлены в работах [6], [7], [8].

Ряд работ посвящен исследованию гидродинамики проточной части напорной камеры, выполненной в виде пространственного осесимметричного поворота на 180° или плоского обратного симметричного поворота, в которых подвод жидкости осуществляется через боковой канал, а отвод — через центральный канал, внутри которого расположена опорная решетка с системой каналов.

Результаты численных и аналитических расчетов течения жидкости в напорных камерах с осесимметричным боковым подводом и центральным отводом потока представлены в работах [12] — [19].

Схемы течения теплоносителя в проточных частях РКС указанного типа представлены в работах [6], [8].

В работе [3] представлены результаты экспериментальной визуализации двух плоских параллельно истекающих струй. Показано наличие отклонения струй от первоначального направления и последующего их слияния.

Работы [25] — [30] посвящены изучению распространения двух параллельно истекающих плоских струй с симметричными условиями на входе.

В работе [3] предложена модель для расчета взаимодействия двух плоских турбулентных параллельно истекающих струй при несимметричных условиях на входе (т. е. неодинаковые струи). Представлен пример расчета взаимодействия двух плоских турбулентных струй, истекающих с одинаковой скоростью из двух разных сопел. Показаны траектории струй и смещение точки соединения при изменении соотношения размеров сопел от 0,15 до 30.

Несмотря на наличие расчетных данных по гидродинамике проточных частей напорных камер, требуется детальное исследование влияние характера течения жидкости в напорной камере на распределение потоков воздуха между смежными отводящими каналами.

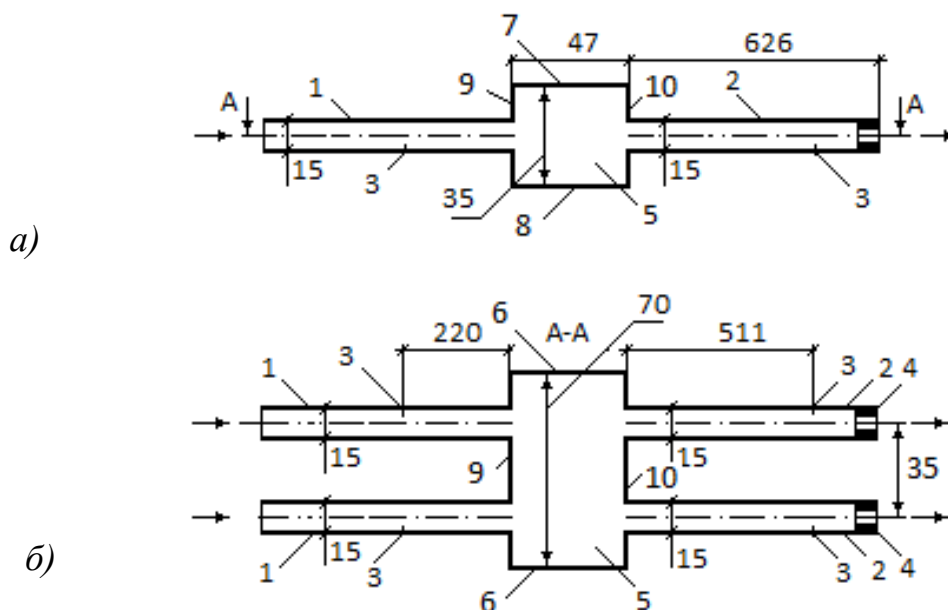
2. Описание исследуемой напорной камеры

Принципиальная схема напорной камеры представлена на рисунке 1.

Используемая в расчетах конструкция состоит из симметричной напорной камеры плоского типа с подключенными к ней двумя подводящими каналами и двумя отводящими каналами.

Жидкость последовательно проходит через подводящие каналы, напорную камеру и выходит из нее через отводящие каналы. Подводящие и отводящие каналы выполнены в виде круглых труб. Напорная камера образована входной и выходной стенками с отверстиями для крепления подводящих и отводящих каналов, двумя боковыми стенками, днищем и крышкой.

В выходных частях отводящих каналов установлены цилиндрические вставки длиной 12 мм и диаметром проходного сечения 8,5 мм.



а) вид на напорную камеру с подводящими и отводящими каналами сбоку;
 б) вид на напорную камеру с подводящими и отводящими каналами сверху;
 1 — подводящий канал; 2 — отводящий канал; 3 — сечение определения скоростей
 жидкости; 4 — вставка; 5 — напорная камера; 6 — боковая стенка; 7 — крышка;
 8 — днище; 9 — входная стенка; 10 — выходная стенка

Рис. 1. Принципиальная схема напорной камеры с подводящими
 и отводящими каналами

3. Методика проведения расчетного исследования течения жидкости в напорной камере

Расчеты проводились с использованием алгоритма SIMPLE для сжимаемого газа (полунейвный метод для уравнений, связанных с давлением — для связи давления и импульса, дополненный методами неполной релаксации для улучшения сходимости) [24], [31], с использованием ($k-\epsilon$) модели описания турбулентного течения со стандартной пристеночной функцией. Алгоритм является устойчивым и обладает достаточной точностью, широко используется в программах CFD моделирования (ANSYS Fluent, STAR CCM+, FlowVision, OpenFOAM).

Расчетная сетка задачи, решаемой методом конечных элементов — неструктурированная тетраэдральная, построена в пакете SALOME-8.8.5, по алгоритму NETGEN, с количеством узлов 84407.

Граничные условия задачи:

- подводящие каналы: устанавливалось граничное условие по скорости воздуха в сечении;
- отводящие каналы: устанавливалось граничное условие по давлению;
- стенка: устанавливалось стандартное граничное условие.

Для каждого варианта проводилось решение задачи на установившийся режим, с переменным шагом по времени от 0,001 секунды до 0,05 секунд. Финальная сходимость всех расчетов составляет порядка 10^{-5} .

4. Результаты расчетного исследования течения жидкости в напорной камере

Расчетные величины полей скорости (векторные и скалярные распределения скорости в центральной плоскости экспериментального участка, а также в местах расположения датчиков на стенде, в поперечных сечениях подводящих и отводящих каналов) приведены на рисунках 2 (вариант 1), 3 (вариант 2), 4 (вариант 3), 5 (вариант 4) и 6 (вариант 5).

Размеры напорной камеры с подводящими и отводящими каналами, принятые при выполнении расчетов, даны на рисунке 1.

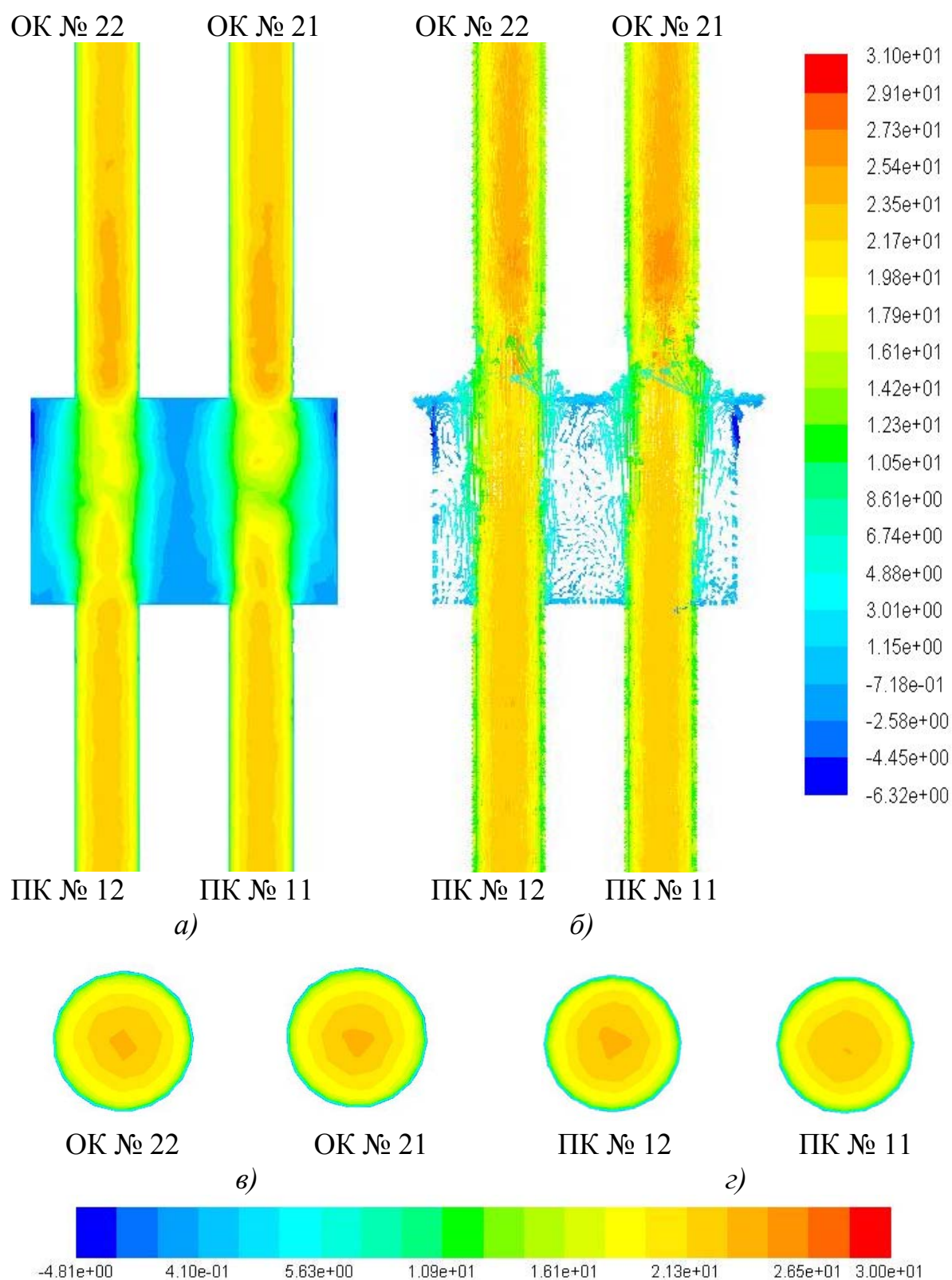
Характеристики гидродинамических параметров проточной части напорной камеры для различных вариантов исследования представлены в таблице.

Характеристики гидродинамических параметров проточной части напорной камеры

Параметры	№ варианта:				
	1	2	3	4	5
T , К	298,2	298,2	298,2	298,2	298,2
G_0 , кг/ч	29,95	30,16	30,01	29,92	29,95
G_{11} , кг/с	0,0042	0,0052	0,0064	0,0071	0,0084
G_{12} , кг/с	0,0042	0,0033	0,0020	0,0012	0,0000
G_{21} , кг/с	0,0042	0,0043	0,0044	0,0044	0,0045
G_{22} , кг/с	0,0042	0,0041	0,0040	0,0039	0,0038
Re_{11}	19259	23937	29432	32893	38721
Re_{12}	19294	15020	9337	5744	0
Re_{21}	19534	19939	20212	20303	20616
Re_{22}	1919	18997	18280	17798	17338
$\bar{w}_{11}$, м/с	19,74	24,52	30,15	33,70	39,66
$\bar{w}_{12}$, м/с	19,77	15,39	9,58	5,90	0
$\bar{w}_{21}$, м/с	20,10	20,50	20,78	20,87	21,18
$\bar{w}_{22}$, м/с	19,74	19,55	18,84	18,36	17,90
ρ_{11} , кг/м ³	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
ρ_{12} , кг/м ³	1,20	1,20	1,20	1,19	1,19
ρ_{21} , кг/м ³	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19
ρ_{22} , кг/м ³	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19
P_{11} , Па	102217	102301	102355	102360	102411
P_{12} , Па	102257	102252	102195	102134	102077
P_{21} , Па	101819	101921	102001	102032	102119
P_{22} , Па	101851	101803	101707	101639	101578

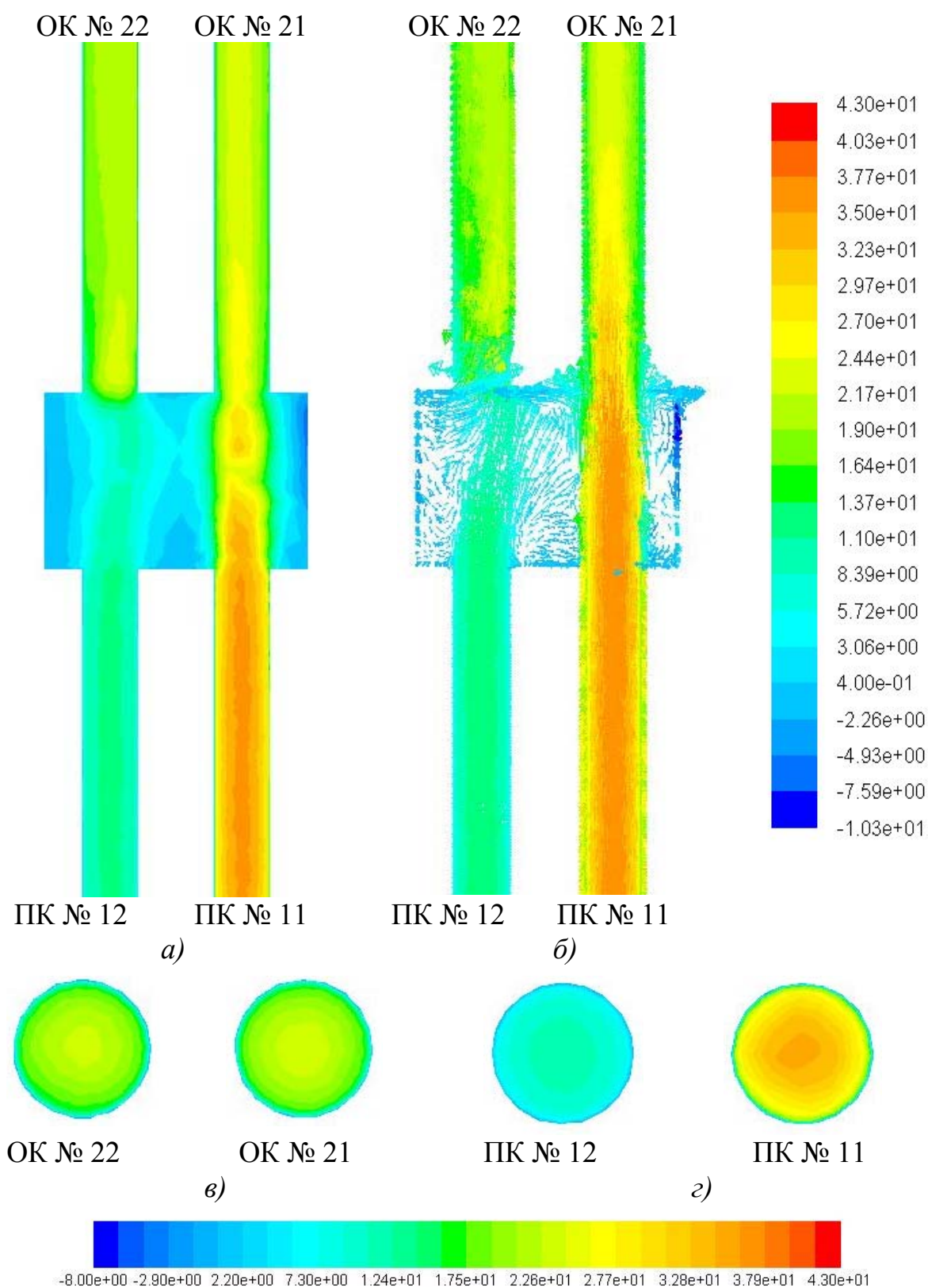
Индексы «11» и «12» — соответствуют подводящим каналам с бóльшим и меньшим расходами жидкости; индексы «21» и «22» — соответствуют отводящим каналам с бóльшим и меньшим расходами жидкости.

В таблице приняты обозначения: G — массовый расход воздуха, кг/с; Re — число Рейнольдса; $\bar{w}$ — средняя скорость воздуха, м/с; ρ — плотность воздушного потока, кг/м³, P — полное давление в потоке, Па.



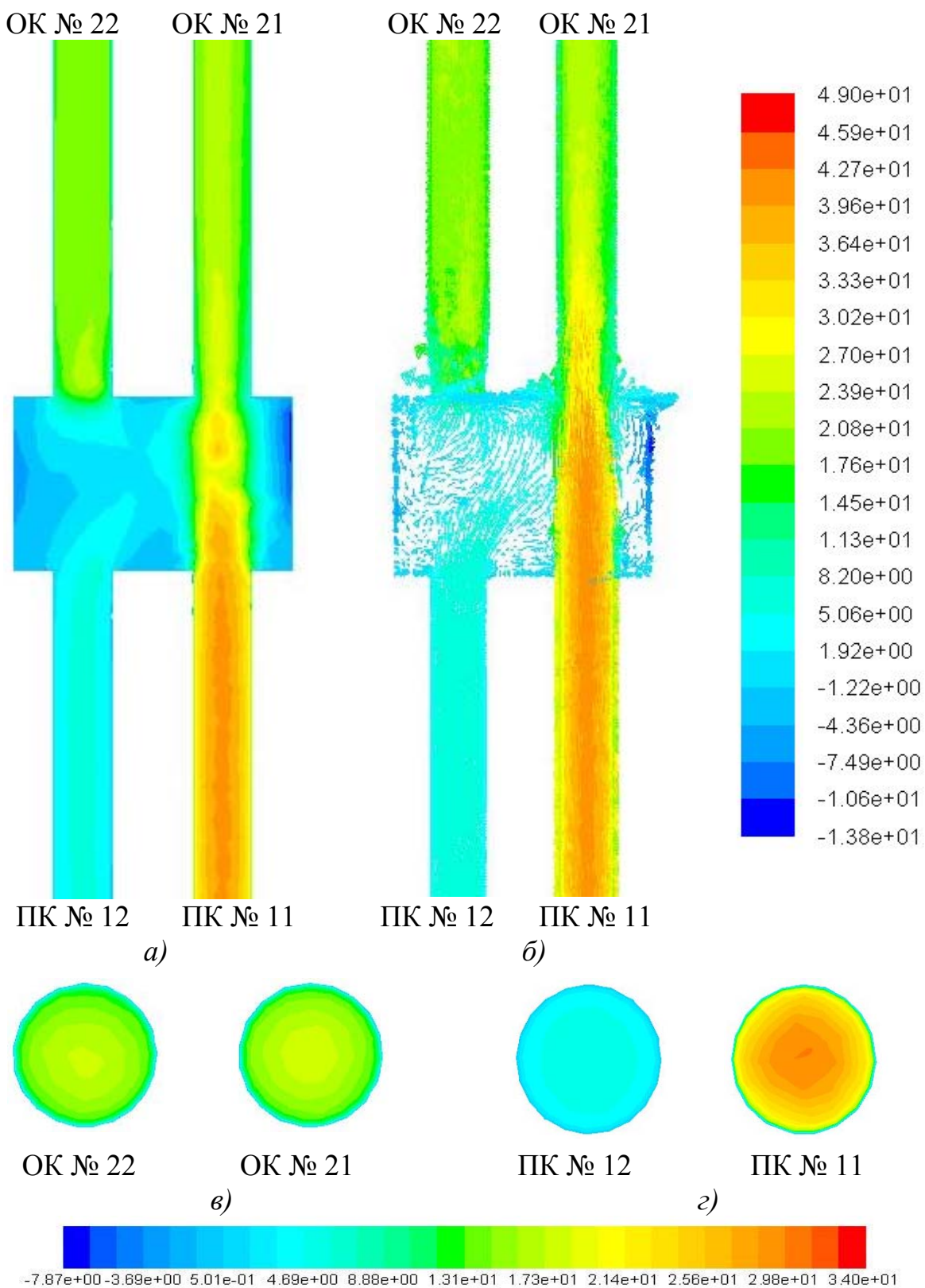
- а) скалярное поле скоростей в напорной камере;
 б) векторное поле скоростей в напорной камере;
 в) скалярное поле скоростей в отводящих каналах;
 г) скалярное поле скоростей в подводящих каналах

Рис. 2. Результаты расчетного исследования течения жидкости в осесимметричной плоской напорной камере при $Re_{12}/Re_{11} = 1,0$ (вар. 1)



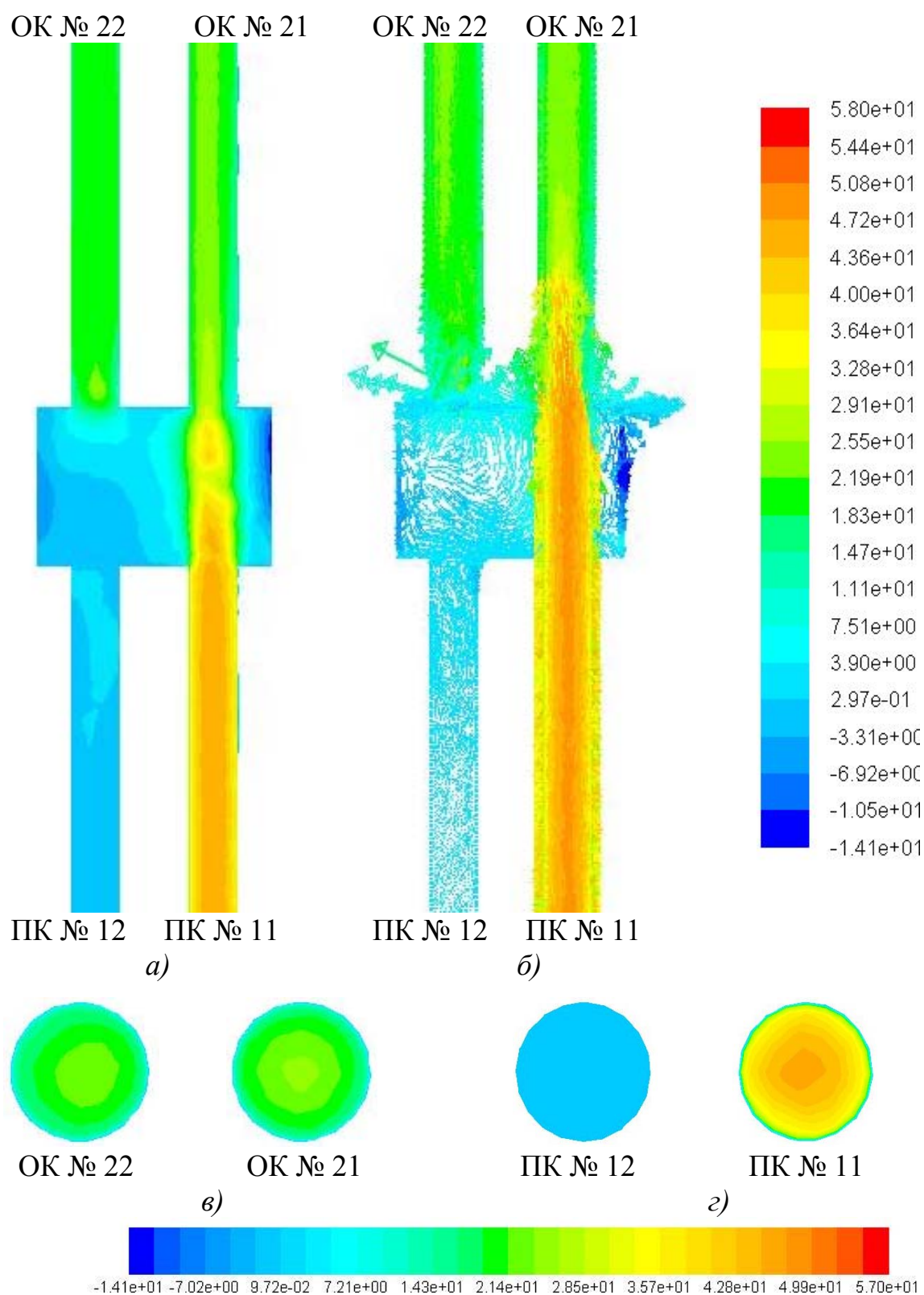
- а) скалярное поле скоростей в напорной камере;
 б) векторное поле скоростей в напорной камере;
 в) скалярное поле скоростей в отводящих каналах;
 г) скалярное поле скоростей в подводящих каналах

Рис. 4. Результаты расчетного исследования течения жидкости в осесимметричной плоской напорной камере при $Re_{12}/Re_{11} = 0,32$ (вар. 3)



- а) скалярное поле скоростей в напорной камере;
 б) векторное поле скоростей в напорной камере;
 в) скалярное поле скоростей в отводящих каналах;
 г) скалярное поле скоростей в подводящих каналах

Рис. 5. Результаты расчетного исследования течения жидкости в осесимметричной плоской напорной камере при $Re_{12}/Re_{11} = 0,17$ (вар. 4)



- а) скалярное поле скоростей в напорной камере;
 б) векторное поле скоростей в напорной камере;
 в) скалярное поле скоростей в отводящих каналах;
 г) скалярное поле скоростей в подводящих каналах

Рис. 6. Результаты расчетного исследования течения жидкости в осесимметричной плоской напорной камере при $Re_{12}/Re_{11} = 0$ (вар. 5)

Схемы течения жидкости в напорной камере

В проточной части напорной камеры течение жидкости имеет сложный характер и определяется соотношением чисел Рейнольдса в подводящих каналах Re_{12}/Re_{11} .

Напорная камера с равными числами Рейнольдса в подводящих каналах

Характерная схема течения жидкости в проточной части указанного типа напорной камеры при отношении чисел Рейнольдса в подводящих каналах $Re_{12}/Re_{11} = 1,00$ представлена на рисунках 2а, б.

Течение жидкости в ней характеризуется следующими особенностями.

На входе в напорную камеру расположены две затопленные конические параллельные друг другу идентичные струи жидкости с одинаковым массовым расходом, движущиеся с углом одностороннего расширения равным 12° — 15° .

Ядро потока каждой струи под прямым углом попадает на входную часть соответствующего ей отводящего канала.

По обе стороны от струй в боковых частях напорной камеры, расположенных между струями и соответствующими боковыми стенками корпуса, имеют место вихревые зоны.

По мере удаления от входной стенки происходит взаимодействие смежных струй жидкости друг с другом и каждой из них с крышкой, днищем и корпусом напорной камеры. В результате возникают полузатопленные струи.

Обе полузатопленные струи попадают по нормали на выходную стенку и поступают в соответствующие им по местоположению отводящие каналы.

При этом течение свободных затопленных струй сопровождается расширением струй.

Для данного вида течения характерно отсутствие поперечных потоков вблизи выходной стенки.

Продольные оси струй соответствуют продольным осям соответствующих отводящих каналов.

В полостях между струями, между струями и стенками корпуса, днища и крышки коллекторной системы возможно возникновение вихревых (застойных) зон.

В выходной части напорной камеры имеют место относительно идентичные условия входа жидкости в отводящие каналы и относительно равномерные профили скорости по радиусам отводящих каналов.

По длине отводящих каналов происходит стабилизация профиля скорости жидкости.

При взаимодействии набегающих на вставки в отводящих каналах потоков возникают кольцевые вихревые зоны в угловых частях отводящих каналов, образованных входными торцевыми частями вставок и стенками отводящих каналов.

Вдоль внутренней поверхности отводящих вставок имеет место напорное течение жидкости.

Выход свободных затопленных конических струй с углом одностороннего расширения 10° — 15° с образованием вихревых зон в области между выходными торцевыми частями вставок и боковыми поверхностями свободных затопленных струй.

Взаимодействие боковых поверхностей свободных затопленных струй, параллельных друг другу, и последующее выравнивание профиля скорости по ходу потоков в результате преобразования (слияния) свободных затопленных струй.

Напорная камера с различным соотношением массовых расходов жидкости через подводящие каналы.

Характерная схема течения жидкости в проточной части указанного типа напорной камеры при соотношении чисел Рейнольдса в подводящих каналах Re_{11}/Re_{12} равном 0,317 представлена на рисунках 4а, б.

Течение жидкости в ней характеризуется следующими особенностями.

На входе в напорную камеру расположены две затопленные струи.

Одна струя, выходящая из подводящего канала с большим массовым расходом жидкости, делится на две неравные части, попадающие в отводящие каналы. Ядро потока основной части данной струи под прямым углом попадает на входную часть соответствующего ей отводящего канала. Другая часть входит в отводящий канал под острым углом.

Другая струя, соответствующая подводящему каналу с меньшим массовым расходом жидкости, имеет отклонение от продольной оси в сторону первой струи и взаимодействует с ней в районе выходной стенки напорной камеры и попадает на соответствующий ей отводящий канал.

По обе стороны от струй в боковых частях напорной камеры, расположенных между струями и соответствующими боковыми стенками корпуса, имеют место вихревые зоны.

По мере удаления от входной стенки происходит взаимодействие смежных струй жидкости друг с другом и каждой из них с крышкой, дном и корпусом напорной камеры. В результате возникают полузатопленные струи.

Обе полузатопленные струи попадают по нормали на выходную стенку и поступают в соответствующие им по местоположению отводящие каналы.

При этом течение свободных затопленных струй сопровождается расширением струй (угол одностороннего расширения свободной затопленной струи составляет 12°).

Для данного вида течения характерно наличие поперечного течения жидкости вблизи выходной стенки напорной камеры.

В центральной части напорной камеры у входной стенки между струями (до места их взаимодействия друг с другом) установлено наличие двух / одной? вихревых зон.

В боковой части напорной камеры, соответствующей местоположению струи с относительно малым расходом жидкости, между периферийными частями входной и выходной стенок, боковой стенкой и боковой поверхностью струи расположена вихревая зона, распространяющаяся за пределы осевой линии, соединяющей соответствующие подводящий и отводящий каналы.

В боковой части напорной камеры, соответствующей местоположению струи с относительно большим расходом жидкости, между входной, выходной и боковой стенками и соответствующей боковой поверхностью струи, расположена вихревая зона.

В напорной камере имеют место различные условия входа жидкости в отводящие каналы и различные профили скорости по радиусам отводящих каналов.

В данном случае течение жидкости в проточной части отводящих каналов и вставок и на выходе из вставок аналогичны течению жидкости в случае фиксированного соотношении массовых расходов жидкости через подводящие каналы.

Напорная камера с подводом жидкости через один подводящий канал

Характерная схема течения жидкости в проточной части указанного типа напорной камеры при подводе жидкости в напорную камеру через один подводящий канал ($Re_{12} > 0$; $Re_{12} = 0$) представлена на рисунках 6а, б.

Течение жидкости в ней характеризуется следующими особенностями.

В данном типе напорной камеры на входе имеет место течение одной круглой затопленной струи жидкости.

По мере удаления от входной стенки напорной камеры свободная затопленная струя взаимодействует с крышкой, днищем и боковой стенкой.

Вблизи выходной отводящей стенки происходит деление полужатопленной струи на две части. Одна часть струи попадает по нормали (углом равным 90°) на выходную стенку и поступает в соответствующий ей по местоположению отводящий канал. При этом течение свободной затопленной струи сопровождается ее расширением (угол одностороннего расширения свободной затопленной струи составляет 12°). Другая часть струи попадает под острым углом на отводящую стенку, преобразуется в полужатопленную струю, движется в направлении смежного отводящего канала и поступает в него.

Таким образом, на входе в отводящие каналы имеет место комбинированное течение струй: под различными углами вход струй в выходные каналы.

Для данного вида течения характерно сочетание различных углов входа струй в отводящие каналы.

В боковой части напорной камеры, соответствующей местоположению струи, между периферийными частями входной и выходной стенок, боковой стенкой и боковой поверхностью струи расположена первая вихревая зона, не выходящая за пределы осевой линии, соединяющей соответствующие подводящий и отводящий каналы.

В боковой части напорной камеры, расположенной между боковой поверхностью струи, второй боковой стенкой, частями входной и выходной стенок расположена вторая вихревая зона.

В данном случае течение жидкости в проточной части отводящих каналов и вставок и на выходе из вставок аналогичны течению жидкости в случае фиксированного соотношении массовых расходов жидкости через подводящие каналы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что исследование гидродинамики проточной части напорной камеры с двумя подводящими и двумя отводящими цилиндрическими каналами по-прежнему является актуальными.

2. Установлено, что характер течения жидкости в напорной камере указанного типа влияет на гидродинамику смежных отводящих каналов на при постоянном массовом расходе жидкости через напорную камеру при турбулентном течении жидкости в ней.

3. Показано, что при работе одного подводящего канала массовый расход жидкости имеет место в обоих отводящих каналах.

4. В результате анализа результатов расчетов выявлены характерные схемы течения жидкости в напорной камере при различных соотношениях массового расхода жидкости в подводящих каналах.

Полученные результаты работы имеют практическую и научную ценность, отвечают актуальным потребностям атомной отрасли, их использование позволит повысить эффективность и надежность работы реакторов и теплообменников ядерных энергетических установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика / – Изд. 4-е, испр. И доп. – М.: Наука, 1976. – 888 с.
2. *Абрамович Г.Н.* Теория турбулентных струй – М.: Физматгиз, 1960. – 716 с.
3. *Алексеев С.В.* Аэродинамические эффекты в энергетике : Препринт. 216 ИТ СО АН СССР. Новосибирск. – 1990. – 58 с.
4. *Афанасьев И.Н., Зинаков Б.И., Храпов Б.И. и др.* К расчету коллекторных систем теплообменных аппаратов // Теплоэнергетика. 1978. № 5. – С. 83–85.
5. *Быстров П.И., Михайлов В.С.* Гидродинамика коллекторных теплообменных аппаратов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с.
6. *Габрианович Б.Н., Дельнов В.Н.* Особенности гидродинамики проточных частей коллекторных систем теплообменников и реакторов ЯЭУ. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016. – 215 с.
7. *Дельнов В.Н.* Гидродинамика типичных раздающих коллекторных систем ЯЭУ: современные представления и перспективы исследования // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2020. – №. 4. – С. 116-128.
8. *Дельнов В.Н.* Уточнение и применение схем течения теплоносителя в раздающих коллекторных системах теплообменников и реакторов ЯЭУ // Избранные

труды АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» / Отв. ред. А.А. Говердовский. – Обнинск, 2021. – С. 175 – 196.

9. *Идельчик И.Е.* Аэродинамика технологических аппаратов (подвод, отвод и распределение потоков по сечению аппаратов). – М.: Машиностроение, 1983. – 351 с.

10. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.

11. *Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С.* Гидродинамические расчеты : справочное учебное пособие. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2007. – 184 с.

12. *Коченов И.С., Новосельский О.Ю.* О гидравлическом расчете системы охлаждения ядерного реактора // Атомная энергия. – 1967. – Т. 23, № 2. – С. 113–120.

13. *Кузнецов Н.М., Наседкин С.П., Демура В.Т.* К вопросу о расчете кругового раздаточного коллектора // Там же. – С. 137–143.

14. *Кумачев В.Я., Леончук М.П., Швецов Ю.Е.* и др. Расчет течения теплоносителя в напорном коллекторе ядерного реактора. – Обнинск: ФЭИ, 1985. (Препринт / Физико-энергетический ин-т; № 1674).

15. *Лунина С.В., Дельнов В.Н.* Тестовые расчеты гидродинамики коллекторных систем теплообменников и реакторов ЯЭУ // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2020. – №. 4. – С. 129–137.

16. *Номофилов Е.В., Романова Т.М.* Исследование некоторых особенностей течения жидкости в прямоугольном и цилиндрическом раздаточных коллекторах. – Обнинск: ФЭИ, 1975. – 20 с. – (Препринт / Физико-энергетический ин-т; № 647).

17. *Номофилов Е.В., Романова Т.М., Филимонов В.Т.* Расчеты полей скорости и давления в плоском раздаточном коллекторе. – Обнинск: ФЭИ, 1973. – 36 с. – (Препринт / Физико-энергетический ин-т; № 391).

18. *Номофилов Е.В., Романова Т.М., Филимонов В.Т.* Расчет полей скорости и давления в цилиндрическом раздаточном коллекторе. – Обнинск: ФЭИ, 1973. – 45 с. – (Препринт / Физико-энергетический ин-т; № 451).

19. *Олейник В.Н., Лимарь Н.Н.* Определение параметров потока в плоском раздаточном коллекторе // Тр. Ленингр. института водного транспорта. – Вып. 162. – Л.: Транспорт, 1978.

20. *Субботин В.И., Кащеев В.М., Номофилов Е.В. и др.* Решение задач реакторной теплофизики на ЭВМ. – М.: Атомиздат, 1979. – 144 с.

21. *Фомичев М.С.* Исследование гидродинамических характеристик потока теплоносителя при подводе его в реактор через один центральный патрубок // ВАНТ. Серия: Реакторостроение. – 1972. – Вып. 1. – С. 19–32.

22. *Фомичев М.С.* Экспериментальная гидродинамика ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 248 с.

23. *Юрьев Ю.С., Бобкова В.Е., Колмаков А.П.* Расчет распределения скорости жидкости за выравнивающей решеткой: – Обнинск: ФЭИ, 1975. – 20 с. – (Препринт / Физико-энергетический ин-т; № 647).

24. *Юрьев Ю.С., Владимиров М.А.* Расчет гидравлических характеристик плоского осесимметричного раздаточного коллектора – Обнинск: ФЭИ, 1982. – 18 с. – (Препринт / Физико-энергетический ин-т; № 1327).

25. *Joel H. Ferziger, Milovan Perić, Robert L. Street.* Computational Methods for Fluid Dynamics. 4th edition. Springer Nature Switzerland AG, 2020. ISBN 978-3-319-99693-6 (eBook) <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99693-6>.

26. *Hong Z.C., Chuang S.H.* Kinetic theory approach to twin plan jet turbulent mixing analysis // AIAA J. 1988. V. 26. – P/ 303 – 310.
27. *Karvounis P. et al.* Numerical and experimental study of flow characteristics in solar collector manifolds // Energies. – 2019. – Т. 12. – №. 8. – С. 1431.
28. *Masters G.F.* Interaction of two plan, parallel jets AIAA J. 1977. V. 15. P. 1756-1762.
29. *Miller D.R., Comings E.W.* Force-momentum fields in a dual-jet flow // J. Fluid Mech. 1960. V. 7. P.237-265.
30. *Tanaka E.* The interference two-dimensional parallel jets // Bull. JSME. 1970. V. 13. P. 272-280.
31. *Tanaka E.* The interference two-dimensional parallel jets // Bull. JSME. 1974. V. 17. P. 920-927.
32. The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM and Matlab. Fluid Mechanics and its Applications 113, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-16874-6. Springer International Publishing, ISBN: 978-3-319-16873-9

Подписано к печати 22.10.2025.

Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. п. л. 0,6. Уч.-изд. л. 1,0.

Тираж 41 экз. Заказ № 297.

Отпечатано в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» методом прямого репродуцирования
с оригинала авторов.

249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.