

Структура газожидкостного потока в трубах КСИА в условиях начального устойчивого режима работы.

Агаев К.Э., Сивенков А.В., Новосёлов А.Г.

kirillmedvedev87@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный университет
низкотемпературных и пищевых технологий.

В статье приведены результаты исследования структуры потока в трубах КСИА. В работе представлены уравнения описывающие границы областей существования трёх основных режимов работы КСИА. Выполнено сравнение экспериментальных и расчётных значений минимальной приведённой скорости уноса газовой фазы.

Ключевые слова: КСИА, минимальная приведённая скорость, начальный устойчивый режим.

Structure of gas-liquid stream in pipes of SJID in conditions of an initial steady operating mode.

Agaev K.E., Sivenkov A.V., Novoselov A.G.

kirillmedvedev87@mail.ru

Saint-Petersburg state university of refrigeration and food
engineering

In article results of research of structure of a stream in pipes of SJID are brought. In work the equations describing borders of areas of existence of three basic operating modes of SJID are presented. Comparison of experimental and settlement values of the minimal resulted speed of ablation of a gas phase is executed.

Keywords: SJID, the minimal resulted speed, initial steady mode.

Газожидкостные и трёхфазные гидродинамические процессы нашли широкое применение в современных технологиях пищевой и микробиологической отраслей промышленности. Эффективность их проведения во многом зависит от конструкции аппарата, в котором реализуются те или иные технологические процессы, предполагающие участие в них веществ, находящихся в газовой, жидкостной и твёрдой фазах. Одной из перспективных конструкций таких аппаратов является

кожухотрубный струйно-инжекционный аппарат (КСИА), который обладает целым рядом преимуществ перед другими известными аппаратами [1].

Ранее [2] было установлено, что работа КСИА характеризуется тремя режимами течения газожидкостной смеси, которые возникают при последовательном увеличении расхода жидкости через основное сопло. При малых расходах жидкости наблюдался начальный установившийся режим. В этом случае происходило поэтапное заполнение опускной трубы газожидкостной смесью. Газожидкостной поток в опускной трубе имел ярко выраженную пузырьковую структуру. При этом пузырьки газа распространялись по длине опускной трубы на определённое расстояние от точки входа струи в жидкость. В подъёмной трубе двигалась только жидкость. При достижении первой критической приведённой скорости жидкости в опускной трубе $W_{кр1}$ происходила смена режима работы аппарата, т.е. наступал неустойчивый режим работы.

Неустойчивый режим характеризовался периодическим образованием крупных газовых снарядов в опускной и подъёмной трубах. Собственно появление крупных газовых снарядов и приводило к неустойчивой (пульсационной) работе аппарата. Прорыв газовых снарядов к верхней камере аппарата, вызывал колебания уровня газожидкостной смеси в опускной и подъёмной трубах, и, соответственно, к периодическому изменению длины свободной струи жидкости, вытекающей из сопла. Это явление объясняет периодическую подачу газовой фазы в аппарат, которая наблюдалась в процессе проведения экспериментов.

При дальнейшем увеличении расхода жидкости через сопло и, следовательно, приведённой скорости жидкости в опускной трубе наступал третий режим работы КСИА – стационарный рабочий режим. Поток газожидкостной смеси в условиях третьего режима характеризуется пузырьковой структурой, которая наблюдается в опускной и подъёмной трубах одновременно. Таким образом, принципиальным отличием первого режима работы КСИА от третьего является:

1. Наличие газовых пузырей только в опускной трубе.
2. Практически бесконечное время пребывания газовой фазы в реакционной зоне, т.е. в опускной трубе.
3. Меньшие энергетические затраты на создание газожидкостной смеси, т.е. на унос газа в трубы и его диспергирование.

Большинство экспериментальных исследований КСИА было посвящено изучению гидродинамических, тепло- и массообменных процессов при работе аппарата в третьем, наиболее интенсивном режиме. Это диктовалось необходимостью иметь аппарат с высокой производительностью по газовой фазе. Такие условия работы требуются при проведении выращивания хлебопекарных дрожжей с высокой концентрацией биомассы в культуральной жидкости [3].

При проведении абсорбционных процессов в КСИА встаёт задача полного использования, поступающего в аппарат газа без его потерь.

В случае работы КСИА в третьем режиме, при абсорбции чистых газов (CO_2 , O_2), объёмные потери газа неизбежны, т.к. время пребывания газовой фазы, в условиях проточного движения через рабочий объём аппарата, мало, и часть газа не успевает раствориться в жидкости. Более того в работе [4] было показано, что растворение CO_2 в КСИА происходит достаточно интенсивно и равновесная концентрация растворённого CO_2 в воде достигается уже на половине длины опускной трубы. Остальной газ в виде нерастворённой фазы удаляется из аппарата. Таким образом, становится очевидным, что проводить данный процесс в третьем режиме работы КСИА не экономично, а более целесообразно проводить его в первом режиме.

В этом случае весь, поступающий газ будет находиться в рабочем объёме до своего полного растворения и потери нерастворённого газа будут исключены. Более того, энергозатраты, связанные с подачей жидкости в аппарат будут существенно сокращены, т.к. подача газа будет происходить при существенно меньших расходах. Исходя из вышеизложенных соображений нами были проведены комплексные исследования гидродинамики образования и движения газожидкостной смеси в КСИА при его работе в области первого режима.

На первом этапе была предпринята попытка определить нижнюю границу существования первого режима работы аппарата. Здесь следует отметить, что верхняя граница существования этого режима была определена нами ранее [5]. Нижняя граница существования первого режима работы КСИА прямым образом связана с началом уноса газа свободной струёй жидкости, вытекающей из сопла. Наши наблюдения и данные других авторов [6] показывают, что унос газа струями и начало образования газожидкостной смеси происходит при определённой скорости истечения v , которую мы назвали начальной скоростью $v_{\text{нач}}$. Очевидно, что эта скорость, соответствующая начальному расходу жидкости через аппарат, будет определять и минимальную приведённую скорость жидкости в опускной трубе $W_{\text{ж min}}$.

Опыты проводились на экспериментальной установке, представленной на рис. 1. В качестве жидкостной фазы использовалась водопроводная вода, а в качестве газовой – атмосферный воздух.

Установка состояла из трехтрубной модели КСИА 1; емкости – накопителя 2; центробежного насоса 3; коммуникационных трубопроводов; жидкостного ротаметра 4; газовых счетчиков ГСБ-400 10; жидкостных дифференциальных манометров 8, 9. Модель КСИА была выполнена из оргстекла, за исключением труб, которые были стеклянными, что позволяло визуально наблюдать за появлением газовых пузырей, а также за структурой потоков и гидродинамической обстановкой в аппарате. Сопло 6 имело возможность перемещаться относительно своей оси и легко заменяться с целью изменения диаметра проходного сечения и длины вытекающей из них струи.

Для регулирования расхода жидкости через сопло использовался регулирующий вентиль 5, а для замены жидкости – кран 12. Температура

жидкости в процессе эксперимента контролировалась термометром. Расход жидкости через сопло определялся с помощью ротаметра 4, а расход инжектируемого струей газа, газовым счетчиком 5. Давление в камере верхней

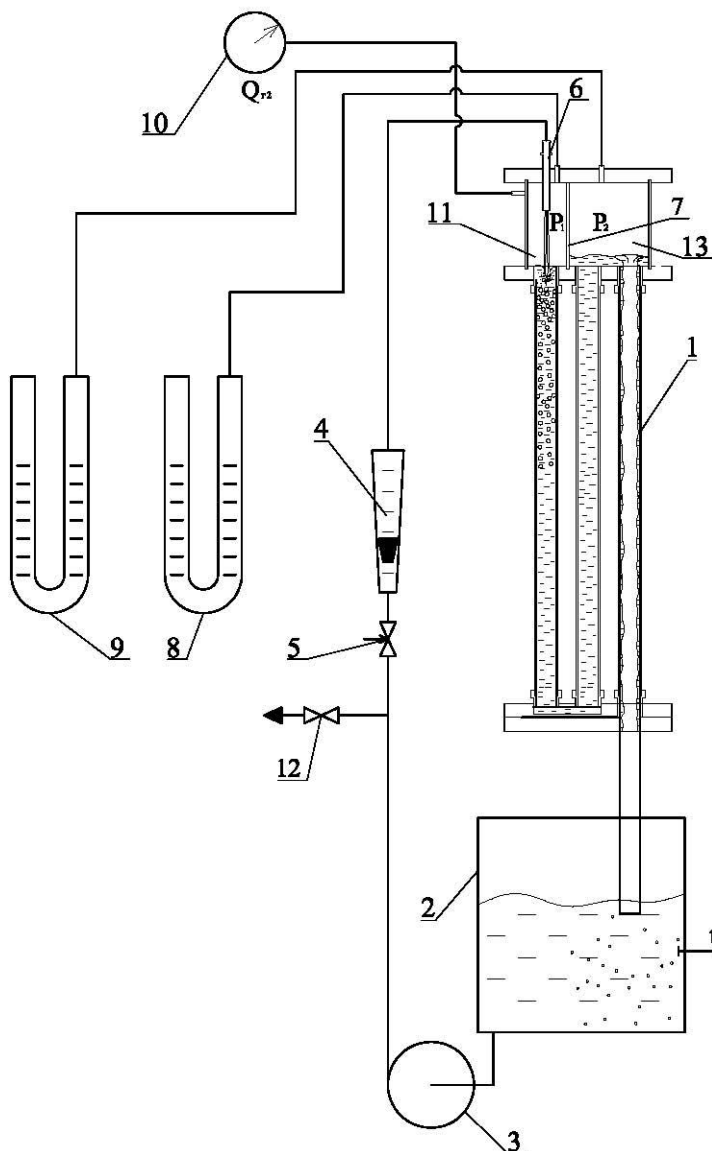


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования начального установившегося режима работы в КСИА.

газовой емкости контролировался с помощью жидкостных дифференциальных манометров 8, 9. Перегородка 7 устанавливалась герметично в верхней газовой камере и разделяла её на две части 11 и 13, что позволяло моделировать проточный режим работы КСИА.

В результате проведенных экспериментов были получены данные по степени заполнения газовыми пузырьками опускной трубы. Как отмечалось выше, появление пузырьков начинается при достижении скорости струи своего определённого значения, т.е. $v_{нач}$. При этом приведенная скорость жидкости в трубе имеет тоже вполне определённое значение $W_{ж\ min}$. Эти данные были получены для трубы диаметром 36 мм и представлены на рис. 2 для различных диаметров сопел d_0 .

Таким образом, нами была получена нижняя граница существования первого режима работы аппарата. Следует отметить, что начало уноса газа в

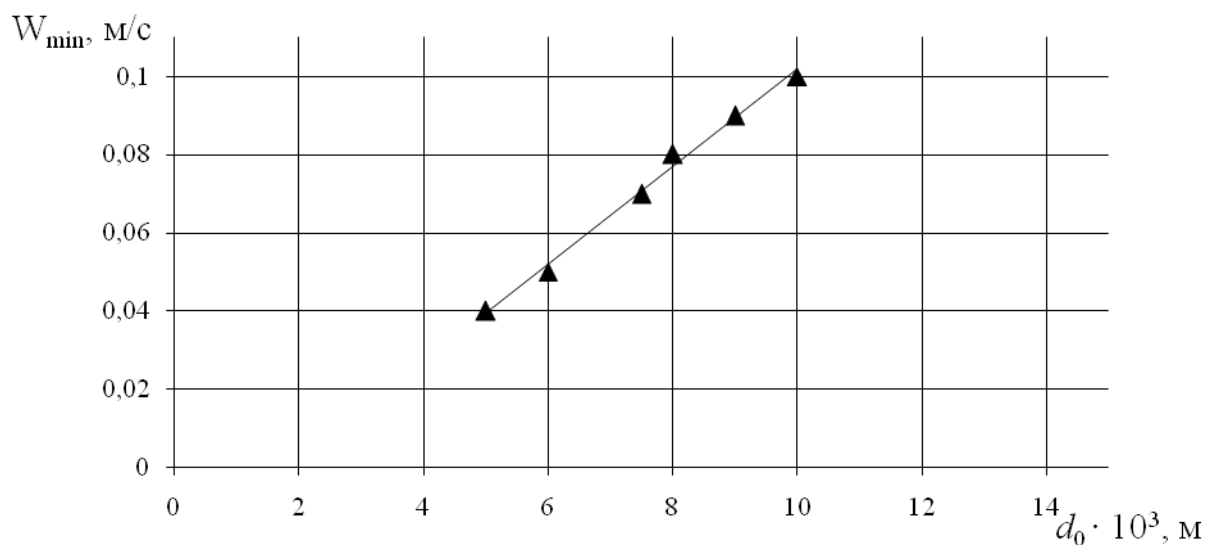


Рис. 2. Граница уноса газа в КСИА в условиях начального устойчивого режима работы.

трубы не зависит от их диаметра, т.к. $d_{\text{тр}} \gg d_c$. Значение $W_{\text{ж min}}$ может быть рассчитано по эмпирической зависимости

$$W_{\min} = 0,219 \left(\frac{H_{\text{эжс}}}{d_{\text{мп}}} \right)^{0,15} \cdot \left(\frac{d_0}{d_{\text{мп}}} \right)^{0,7} \cdot \rho \cdot d_{\text{мп}}^{0,5} \quad (1)$$

где $d_{\text{тр}}, d_0$ – диаметры сопел и труб, соответственно, м;

$H_{\text{гж}}$ – высота газожидкостного столба в трубах, численно равная длине опускных и подъемных труб, м.

Средняя погрешность сходимости расчётных и экспериментальных данных составила 10%.

Далее было изучено изменение степени заполнения опускной трубы газожидкостной смесью. Характер изменения степени заполнения приведён на рис. 3.

Для случая первого режима работы КСИА степень заполнения опускной трубы. Зависит от кинетической энергии струи и практически не зависит от разности давлений в камерах 11 и 13.

Результаты экспериментов, представленных на рис. 3, показывают, что заполнение опускной трубы происходит с разной скоростью, что определяется разными механизмами. Таких можно выделить четыре.

Рассмотрим их на примере нижней линии (сопло $d_0 = 10$ мм) по мере увеличения приведённой скорости жидкости в опускной трубе $W_{\text{ж}}$.

При самых малых расходах жидкости, при которых начинается унос газа, наблюдалось появление одиноких пузырей в объём жидкости в трубе. Для данного случая, в диапазоне $W_{\text{ж}} = (2 \div 6) \cdot 10^{-2}$ м/с, увеличение высоты газожидкостного слоя не наблюдалось. Количество пузырей увеличивалось,

но все они достаточно быстро всплывали, и при малом уносе газа струёй, задержек

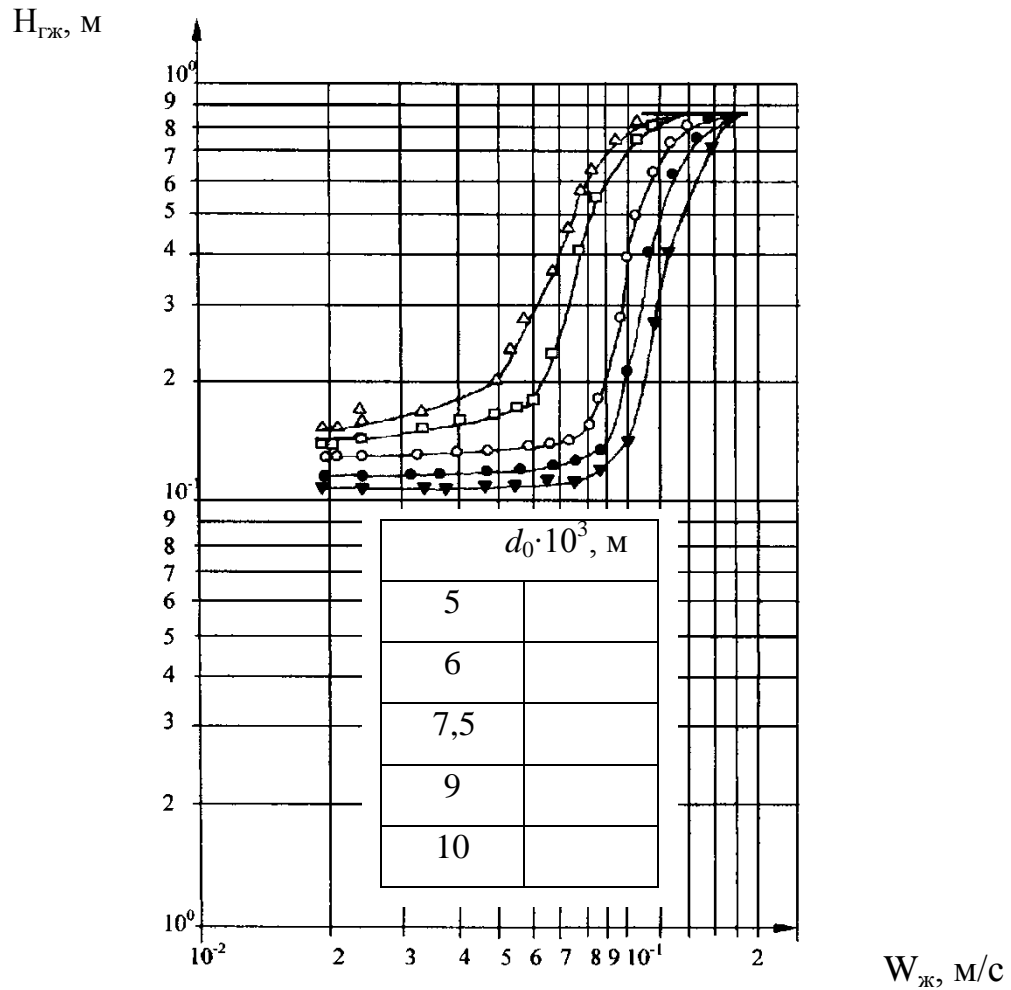


Рис. 3. Зависимость степени заполнения опускной трубы $H_{гж}$ газожидкостной смесью от приведенной скорости жидкости $W_{ж}$ для различных диаметров сопел, $d_{тр} = 36 \cdot 10^{-3}$, м (начальный устойчивый режим).

пузырей в жидкости не происходило. Образующиеся пузыри быстро всплывали, не распространяясь вниз по течению, т.е. объём трубы, занимаемый

газожидкостной смесью в этом диапазоне скоростей был постоянным. При увеличении $W_{ж} > 0,06$ м/с, когда количество пузырей в этом объёме нарастало, т.к. унос газа увеличивается с увеличением $W_{ж}$ и, соответственно, u_0 , количество пузырей становится таким, что истинная скорость жидкости увеличивается, и её воздействие на пузырьки становится ощутимым, т.е. она начинает их уносить в глубь опускной трубы. Как видно из рис. 3 в диапазоне $W_{ж} = (0,06 \div 0,1)$ м/с степень заполнения опускной трубы возрастает, а начиная с $W_{ж} > 0,1$ м/с происходит резкое возрастание $H_{гж}$, даже при незначительном увеличении $W_{ж}$.

Такое поведение в скорости заполнения жидкости газом можно объяснить отсутствием уплотнения пузырьков, которое наблюдалось при $W_{ж} = (0,06 \div 0,1)$ м/с. Образовавшиеся пузырьки располагаются настолько плотно,

что вынуждены под давлением жидкости смещаться вниз по течению, разряжая тем самым пространство за счёт расширения области газожидкостной смеси.

При достижении $W_{ж} = W_{кр}$ наблюдался переход первого режима во второй (неустойчивый). Проведённые эксперименты позволили уточнить карту режимов работы КСИА, дополнив ранее полученные данные, нижней границей первого режима, которая в уточнённом виде представлено на рис.4.

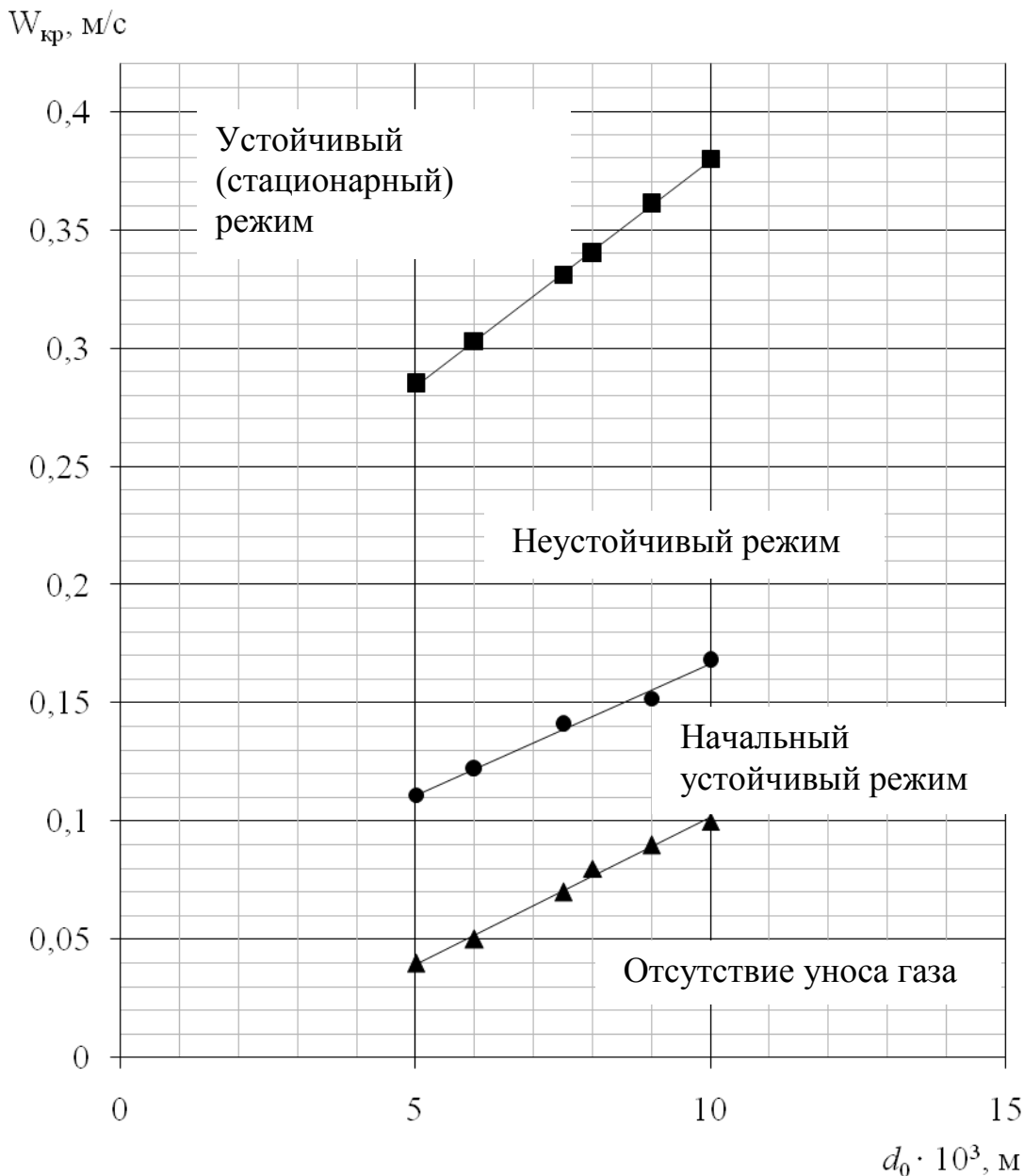


Рис. 4. Границы режимов работы КСИА проточного типа $d_{тр} = 36 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Обработка всех экспериментальных данных (т.е. для всех трёх режимов) позволила получить эмпирические уравнения для определения границ существования того или иного режима, а именно

нижняя граница существования первого режима ($W_{ж \text{ min}}$) по уравнению (1)

верхняя граница области первого режима ($W_{кр1}$) по уравнению

$$W_{кр1} = 0,517 \left(\frac{H_{эж}}{d_{тр}} \right)^{0,15} \cdot \left(\frac{d_0}{d_{тр}} \right)^{0,6} \cdot \rho \cdot d_{тр}^{0,5} \quad (2)$$

нижняя

граница области третьего режима ($W_{кр2}$)

$$W_{кр2} = 0,62 \left(\frac{H_{эж}}{d_{тр}} \right)^{0,15} \cdot \left(\frac{d_0}{d_{тр}} \right)^{0,4} \cdot \rho \cdot d_{тр}^{0,5} \quad (3)$$

Эмпирические зависимости (1÷3) применимы в диапазоне изменения диаметров сопел $d_0 = (5 \div 10) \cdot 10^{-3}$ м, а также диаметров труб КСИА $d_{тр} = 36 \cdot 10^{-3}$ м. Максимальное расхождение расчётных и экспериментальных значений $W_{ж \min}$, $W_{кр1}$, $W_{кр2}$ не превышает $\pm 11,2\%$.

Полученные уравнения позволяют более объективно подойти к составлению методики расчёта КСИА при его эксплуатации в первом режиме работы.

Список литературы.

1. Новосёлов А.Г., Тишин В.Б., Гуляева Ю.Н. Повышение эффективности промышленных ферментаторов. – Вестник Международной Академии Холода, 1998, вып. 1, с 36–38.
2. Сивенков А.В., Агаев К.Э., Дугнист А.В. Гидравлические сопротивления движению двухфазных потоков в вертикальных трубах кожухотрубных струйно-инжекционных аппаратов (КСИА). Известия Вузов. Пищевая технология, Краснодар, 2010, №1, с.118-120.
3. Сивенков А. В., Дугнист А. В., Новосёлов А. Г. Повышение эффективности дрожжевого производства путём культивирования хлебопекарных дрожжей при высоких концентрациях биомассы. Хранение и переработка сельхоз сырья. М., 2009, №11, с 47–51.
4. Новосёлов А.Г. Массообмен и поверхность контакта фаз в струйно-инжекционных кожухотрубных сатураторах. – Дис. ... канд. техн. наук, Л., ЛТИХП, - 134 с.
5. Сивенков А. В., Дугнист А. В., Новосёлов А. Г. Гидродинамика движения двухфазных потоков в вертикальных трубах кожухотрубного струйно-инжекционного аппарата (КСИА). Режимы работы аппарата. – Известия СибГУНиПТ, 2009, №3/4 – с 58-60.
6. Lin T.J., Donnelly H. G. Gas bubble entrainment by plunging laminar liquid jets. – A. I. Ch. E. J., 1966, v.12, №3, p. 563-571.