

Experimental Study of Gas Entrainment by Free Jets of Water-Slurry Suspensions into Tubes of Shell-and-Tube Jet-Injection Apparatus

**Malakhov Y.L., Kuznetsov A.Yu., Novoselov A.G., Chebotar A.V.,
Baranov I.V., Rumiantceva O.N., Mironova D.Yu.**

ITMO University
Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract. In industries, the task of intensifying the process of dissolving gases in liquid media is relevant, since the time of the technological cycle depends on its course. Absorption processes affect the quality of the finished product and energy costs. In the food industry shell-and-tube jet injectors (SJT) are widespread, in which the mechanical injection of a free-falling jet of liquid surrounding its gas is applied. The aim of this work is to investigate the process of gas entrainment by free jets of water-malt slurry (WSS) in the pipes of the SJT. The set goal was achieved by solving the tasks: creating an experimental stand to study the process of atmospheric air injection by water-salt suspensions in the tubes of the SJT; developing a methodology for experimental studies; conducting research on the processes of gas injection by free liquid jets depending on the flow rate and liquid concentration. The most important result of the work is the establishment of graphical and mathematical dependences for the investigated WSS hydromodules, which allow calculating the flow rate carried away by the jet depending on the nozzle diameter. It is found that the gas phase entrainment by free suspension jets is influenced by the viscosity of the suspension, which depends on a number of technological parameters. The practical significance of the obtained results consists in the proposed methodology for calculating the design characteristics of SISA, providing the highest efficiency of its operation taking into account the properties of working environments and parameters of technological processes.

Keywords: shell-and-tube jet injector, injection, shell-and-tube heat exchanger, heat and mass exchange, gas-liquid jet, water-malt slurry, hydromodulus.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.2-58-10>

UDC: 637.143

Cercetarea experimentală al antrenării gazelor prin jeturi libere de suspensii apă-malț în tuburile unui aparat de injecție cu jet cu carcasă și tub

**Malahov Y.L., Kuznețov A.Iu. Novoselov A.G., Cebotar A.V.,
Baranov I.V., Rumeașțeva O.N., Mironova D.Iu.**

Universitatea ITMO, Sanct-Petersburg, Federația Rusă

Rezumat. În diverse industrii, sarcinile de intensificare a procesului de dizolvare a gazelor în medii lichide sunt relevante, deoarece timpul ciclului tehnologic depinde în mod semnificativ de cursul acestuia. Procesele de absorbție afectează atât calitatea produsului finit, cât și costurile energetice în producția acestuia. În industria alimentară s-au răspândit aparatele de injecție cu jet cu carcasă și tub (AIJCT), în care este utilizat fenomenul de injecție mecanică printr-un jet de lichid în cădere liberă a gazului din jur. În ciuda numărului mare de studii în acest domeniu, problema unei abordări teoretice a estimării cantității de antrenare a gazului prin jeturi libere de lichid nu a fost complet rezolvată până acum. Scopul lucrării este de a studia procesul de antrenare a gazelor prin jeturi libere de suspensii apă-malț (SAM) în conductele AIJCT. Scopul stabilit a fost atins prin rezolvarea următoarelor sarcini: realizarea unui stand experimental pentru studierea procesului de injectare a aerului atmosferic prin suspensii apă-malț în conductele AIJCT; elaborarea metodologiei de cercetare experimentală; efectuarea cercetărilor asupra proceselor de injectare a gazelor prin jeturi libere de lichid în funcție de debitul de ieșire și concentrația lichidului. Standul experimental elaborate a fost folosit pentru a studia antrenarea gazului de către un jet de suspensie liberă care curge dintr-o duză cilindrică. Cel mai important rezultat al lucrării este stabilirea unor dependențe grafice și matematice pentru modulele hidraulice studiate ale SAM care permit calcularea debitului de aer transportat de jet, în funcție de diametrul duzei. Semnificația practică a rezultatelor obținute constă în metoda propusă de calcul a caracteristicilor structurale ale AIJCT, care asigură cea mai mare eficiență a funcționării acestuia, ținând cont de proprietățile mediilor de lucru și parametrii procesului.

Cuvinte-cheie: aparat de injecție cu jet cu carcasă și tub, injecție, schimbător de căldură cu carcasă și tub, transfer de căldură și masă, jet gaz-lichid, suspensie apă-malț, hidromodul.

Экспериментальное исследование уноса газа свободными струями водно-солодовых суспензий в трубы кожухотрубного струйно-инжекционного аппарата

Малахов Ю.Л., Кузнецов А.Ю. Новоселов А.Г., Чеботарь А.В.,

Баранов И.В., Румянцева О.Н., Миронова Д.Ю.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В различных отраслях промышленности актуальны задачи интенсификации процесса растворения газов в жидких средах, поскольку от его протекания существенно зависит время проведения технологического цикла. Абсорбционные процессы влияют как на качество готовой продукции, так и на энергетические затраты при её производстве. В пищевой промышленности получили распространение кожухотрубные струйно-инжекционные аппараты (КСИА), в которых применяется явление механической инъекции свободно падающей струей жидкости окружающего её газа. Несмотря на большое число исследований в данной области, проблема теоретического подхода к оценке количества уноса газа свободными струями жидкости до настоящего времени полностью не решена. Целью работы является исследование процесса уноса газа свободными струями водно-солодовых суспензий (ВСС) в трубы КСИА. Поставленная цель достигнута за счет решения следующих задач: создание экспериментального стенда для исследований процесса инъекции атмосферного воздуха водно-солодовыми суспензиями в трубах КСИА; разработка методики экспериментальных исследований; проведение исследований процессов инъекции газа свободными струями жидкости в зависимости от скорости истечения и концентрации жидкости. На разработанном экспериментальном стенде проводилось изучение уноса газа свободной суспензионной струей, вытекающей из цилиндрического сопла. Наиболее важным результатом работы является установление для исследуемых гидромодулей ВСС графических и математических зависимостей, позволяющих рассчитывать расход воздуха, уносимого струей, в зависимости от диаметра сопла. Установлено, что на унос газовой фазы свободными суспензионными струями оказывает влияние вязкость суспензии, которая зависит от ряда технологических параметров (степень измельчения зерна, его химический состав и т.п.). Практическая значимость, полученных результатов, состоит в предложенной методике расчета конструктивных характеристик КСИА, обеспечивающей наибольшую эффективность его работы с учётом свойств рабочих сред и параметров технологических процессов.

Ключевые слова: кожухотрубный струйно-инжекционный аппарат, инъекция, кожухотрубный теплообменник, тепломассообмен, газожидкостная струя, водно-солодовая суспензия, гидромодуль.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день вопросы повышения эффективности тепло- и массообменных процессов в пищевых технологиях являются крайне актуальными.

Для применения в пищевой промышленности одними из перспективных тепло-массообменных аппаратов являются кожухотрубные струйно-инжекционные аппараты (КСИА).

Данный тип устройств представляет собой универсальный аппарат для проведения тепло-массообменных процессов в пищевых технологиях, поскольку позволяет проводить одновременно тепло-массообменные процессы между газом и жидкостью. Различные модификации конструкции КСИА были апробированы на пищевых производствах, в том числе для технологий получения газированных напитков на основе воды, молочной сыворотки, фруктовых и овощных соков (сатурация напитков), хлебопекарных дрожжей (культивирование биомассы), пива (на стадиях культивирования биомассы и сбраживания сусле), этанола (на стадиях проведения водно-тепловой

обработки зернового сырья, осахаривания и сбраживания), олифы (на стадиях окисливания растительного масла) [1,2,3,4,5].

Во всех вышеприведенных случаях КСИА показал свою работоспособность и эффективность. Однако, промышленное производство КСИА требует научно-обоснованной методики их расчетов, основанной на системном анализе всех происходящих явлений в рабочем объеме аппарата.

В работах [6,7,8,9,10] показано, что, несмотря на достаточно большое число опубликованных исследований, проблема теоретического подхода к оценке количества уноса газа свободными струями жидкости до настоящего времени не имеет решения.

В основе механизма подачи газовой фазы в КСИА лежит явление механической инъекции свободно падающей струей жидкости окружающего её газа. Именно этот эффект, в совокупности с конструкцией вертикального кожухотрубного

теплообменника (КТО), позволяет проводить одновременно тепло-массообменные процессы между газом и жидкостью. Простота конструкции КСИА и возможность регулировки подачи газовой фазы в реакционный объем, без установки газонагнетательного оборудования сделала этот аппарат одним из перспективных для получения пивного суслу из солодовых суспензий при проведении водно-тепловой обработки - одной из важнейших технологических стадий в пивоварении.

Большинство исследований КСИА носит экспериментальный характер, а полученные уравнения являются эмпирическими, с той или иной степенью точности, описывающими объемный унос количества газовой фазы в пределах рабочих режимов проведенных экспериментов. Кроме того, подавляющая часть экспериментов была проведена на воде, что не позволяет судить о влиянии физических свойств других рабочих сред на этот процесс [3,6,11,12,13,14]. Несмотря на то, что газовая фаза не несет в себе определенных функций, влияющих на качество пивного суслу, она определяет энергетическую составляющую проводимого процесса. Учитывая, что солодовые суспензии обладают значительной вязкостью, то присутствие газовой фазы в виде мелких пузырей снижает гидравлические потери энергии на трение. Кроме того, предполагается, что наличие мелких пузырей приводит к турбулизации жидкостной фазы, стимулируя более интенсивное растворение крахмальных зерен солода.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальное изучение уноса газа свободной суспензионной струей, вытекающей из цилиндрического сопла, выполнялось на экспериментальной установке, представленной на рис. 1.

Экспериментальная установка состояла из трехтрубной модели струйно-инжекционного аппарата (СИА) I, емкости-накопителя (Е-Н) II, циркуляционного насоса III.

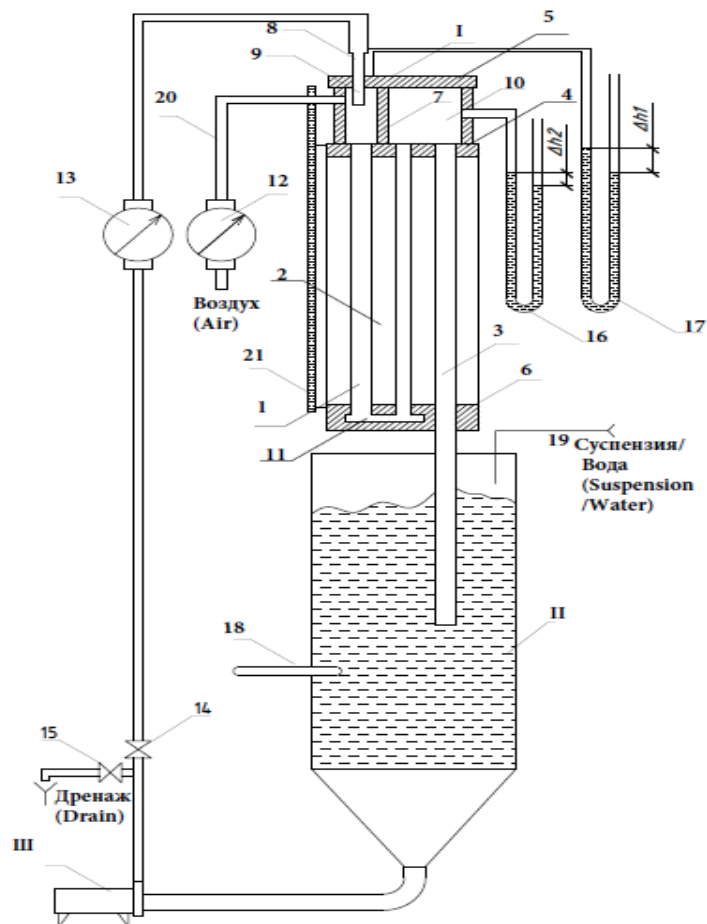
Модель СИА I представляла собой вертикальный КТО без теплообменной рубашки и была выполнена из прозрачных материалов для возможности визуальных наблюдений за гидродинамической обстановкой. Аппарат состоял из вертикальных труб (опускная труба 1, подъемная труба 2, сливная труба 3). Эти трубы закреплены в трубных решетках 4 и 6.

К нижней трубной решетке 6 прикреплялось днище аппарата с переходным каналом 11 и сливным отверстием, равным внутреннему диаметру труб 36 мм. Над верхней трубной решеткой 4 была размещена верхняя газовая камера, образованная прозрачными стенками, верхней трубной решеткой 4 и верхней крышкой 5. Верхняя газовая камера была разделена перегородкой 7 на две части: приемную камеру 9 и верхнюю циркуляционную камеру 10. Трубы 1, 2 и 3 с внутренним диаметром 36 мм и длиной 0,8 м были изготовлены из стекла, а соединительные фланцы и стенки верхней газовой камеры аппарата из оргстекла.

В аппарат подавался приготовленный объем суспензии заданного гидромодуля. Затем включался насос III и при не полностью открытом кране 14 производилось заполнение исследуемой суспензией циркуляционного жидкостного трубопровода модели КСИА. Затем полностью открывался кран 14 и фиксировался расход суспензии электромагнитным расходомером 13 марки «Proline Promag 55». Суспензия под напором, создаваемым насосом III, вытекала из сопла 8 в виде свободной жидкостной струи. Она инжигировала окружающий её воздух, и далее полученная смесь поступала в опускную трубу 1. Затем, образовавшаяся газо-суспензионная смесь двигалась в виде нисходящего потока к нижнему концу опускной трубы 1, перетекала через переходной канал 11 и поступала в подъемную трубу 2. В подъемной трубе 2, газо-суспензионная смесь двигалась восходящим потоком и поступала в верхнюю циркуляционную камеру 10, из которой сливалась по сливной трубе 3 в емкость-накопитель II. Поток воздуха поступал в приемную камеру 9 через газовый счетчик 12 по газовой коммуникации 20 за счет разности между атмосферным и абсолютным давлениями в приемной камере 9. Перепад давлений возникает в результате уноса свободной суспензионной струей газовой фазы, из приемной камеры 9 в трубу 1.

Эксперименты по изучению уноса газа свободными суспензионными струями в вертикальные трубы КСИА выполнялись по методике, разработанной авторами.

Суть данной методики заключается в следующем. Предварительно устанавливалось сопло заданного диаметра.



I – модель струйно-инжекционного аппарата; II – емкость-накопитель; III – циркуляционный насос; 1 – опускающая труба, 2 – подъемная труба; 3 – сливная труба; 4 – верхняя трубная решетка; 5 – верхняя крышка; 6 – нижняя трубная решетка; 7 – перегородка; 8 – съемное сопло; 9 – приемная камера; 10 – верхняя циркуляционная камера; 11 – переходной канал; 12 – газовый счетчик; 13 – электромагнитный жидкостной расходомер; 14 – регулирующий вентиль, 15 – сливной кран; 16, 17 – дифференциальные жидкостные манометры; 18 – термометр; 19 – линия подачи суспензии; 20 – воздушная магистраль, 21 – миллиметровая линейка.

Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки по исследованию гидродинамики.¹

Подготовленные к исследованию массы измельченного солода и воды тщательно взвешивались, смешивались в предварительно оттарированной емкости. Полученная ВСС заданного гидромодуля переносилась в емкость-накопитель II. После внесения заданного объема суспензии, включался насос III, суспензия заполняла установку и циркулировала в течение 3 минут. Затем измерялись: 1) расход суспензии с помощью электромагнитного расходомера 13; 2) расход воздуха, уносимого свободной суспензионной струей, при помощи барабанного газового счетчика «ГСБ-400»; 3) давление в камерах 9 и 10 с помощью дифференциальных

жидкостных манометров 16 и 17; 4) температуры суспензии с помощью спиртового термометра; 5) уровень суспензии в опускающей трубе 1 при помощи миллиметровой линейки 21. В процессе опытов фиксировались структуры потоков в трубах.

Исследование начинали с максимального расхода суспензии. По окончании измерений меняли исследованное сопло на другое, с меньшим диаметром проходного сечения. Затем изменялся гидромодуль суспензии, и цикл измерений проводился по вышеизложенной последовательности.

¹ Appendix 1

Из данных измерений рассчитывали расход воздуха через аппарат по уравнению:

$$Q_g = \frac{V_g}{t}, \quad (1)$$

где V_g - объём воздуха, прошедший через счетчик газа, за время t .

Зная Q_g , определяли приведенную скорость газа в трубах по уравнению:

$$\omega_g = \frac{Q_g}{S_{Pi}} = \frac{4 \cdot Q_g}{\pi \cdot d_{Pi}^2}. \quad (2)$$

По результатам измерений расхода суспензии Q_s , рассчитывали скорость истечения суспензии из сопла v_0 :

$$v_0 = \frac{Q_s}{S_0} = \frac{4 \cdot Q_s}{\pi \cdot d_0^2}, \quad (3)$$

и приведенную скорость суспензии в трубах:

$$\omega_s = \frac{Q_s}{S_{Pi}} = \frac{4 \cdot Q_s}{\pi \cdot d_{Pi}^2}. \quad (4)$$

По величине уровня газо-суспензионной смеси в опускной трубе H_{S_1} с учётом

фиксированного расположения сопла 8 и толщины фланца 4, определялась длина свободной суспензионной струи:

$$L_s = H_{g_1} - H_{S_1}, \quad (5)$$

где H_{g_1} - расстояние от верхней поверхности фланца 4 до среза сопла 8, равное 0,915 м.

Температура суспензии определялась с помощью спиртового термометра, установленного на выходе солодовой суспензии из сливной трубы.

Для обработки опытных данных необходимо было связать отраслевое понятие «гидромодуль» с физическим понятием «концентрация» твердой фазы (измельченный солод) в воде. Для этого был сделан пересчет, который представлен в таблице 1.

Таблица 1.²

Сопоставление величин гидромодуля и концентрации твердой фазы в воде³

Гидромодуль, кг зерна/кг воды (Hydromodulus, seeds kg/water kg)	Концентрация кг солода/кг смеси (Concentration, malt kg/ blend kg)
1:6	0,142
1:4	0,2
1:3,5	0,222
1:3	0,25
1:2,5	0,286

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрение механизма уноса газа в трубы КСИА необходимо проводить с учетом влияния конструктивных особенностей аппарата на состояние структуры струи в точке ее входа в жидкостную фазу.

Структура струи в первую очередь будет определяться геометрическими размерами и формой проходного сечения сопла, но также очевидно, что на развитие этой структуры будут оказывать влияние и физические свойства протекающей через него жидкости, а именно,

плотность, вязкость и поверхностное натяжение [17].

На рис. 2 показано развитие формы свободной струи, начиная от капельного истечения при очень малых расходах жидкости, до полного разрушения струи при очень больших расходах.

Как видно из рисунка 2, при фиксированном расстоянии от среза сопла до свободной поверхности жидкости, структура струи сильно зависит от скорости истечения. При этом можно выделить 9 состояний.

^{2,3}Appendix 1

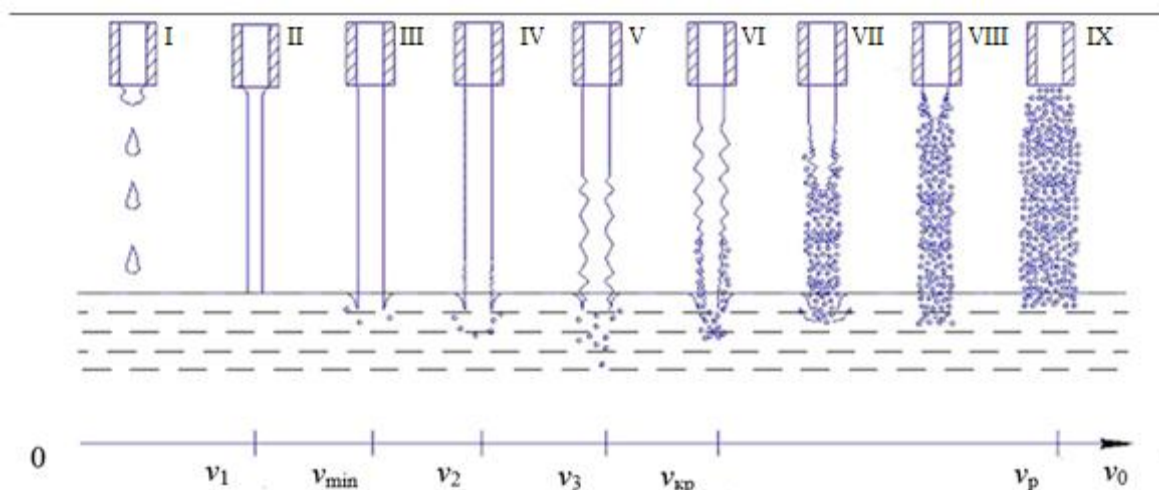


Рис. 2. Изменение состояния свободной поверхности струи при ее постоянной длине (условно) в зависимости от скорости истечения v_0 .⁴

Состояние I характерно для очень малых расходов жидкости. Оно определяет капельное истечение жидкости в диапазоне скоростей от $v \geq 0$ до v_1 .

В пределах этого диапазона происходит образование капель, но по достижении некой скорости v_1 , начинается непрерывное истечение жидкости из сопла. С этого момента появляется свободная непрерывная струя жидкости, состояние II.

Очевидно, что на состояние поверхности свободной струи будет оказывать влияние, так называемая предыстория потока жидкости на входе в сопло.

В частности, её начальная турбулентность, зависящая, в свою очередь, от гидравлических сопротивлений подводящего трубопровода. Наличие только этого фактора, приводит к тому, что значение скорости v_1 в различных случаях подведения жидкости к соплу будет различным. Тем не менее, если гидравлические сопротивления трубопровода постоянны и зависят только от средней скорости потока в нем, то значения v_1 для жидкости постоянных физических свойств будет близко к постоянному значению.

С момента образования свободной струи жидкости при скорости v_1 она имеет гладкую поверхность по всей длине, но при этом значении скорости диаметр струи на выходе из сопла несколько больше, чем на входе в свободный объем жидкости, на расстоянии L . Это обусловлено тем, что под действием сил земного притяжения частицы жидкости ускорятся, а подача жидкости к соплу

ограничена силами трения жидкости о стенки сопла.

Действующие силы поверхностного натяжения стремятся сжать струю, и поэтому на каком-то расстоянии от среза сопла диаметр струи d_J начинает уменьшаться.

С увеличением скорости истечения, т. е. с увеличением расхода жидкости, этот эффект вырождается и диаметр струи остается постоянным по всей длине при этом свободная поверхность струи остается гладкой. При этом, следует отметить, что унос газа такими свободными струями не происходит. Этот эффект использовался рядом исследователей для разработки метода определения коэффициентов молекулярной диффузии (так называемый метод ламинарной струи) [17,18,19]. Однако даже при незначительном увеличении скорости истечения свободной струи v_1 до значения v_{min} начинается унос окружающего струю газа (состояние III).

В первую очередь унос газа свободной струей жидкости обусловлен разностью скоростей самой струи и скоростью частиц жидкости находящейся в объеме жидкости, в который она поступает. В результате происходит торможение струи в точке входа её в объем жидкости и на поверхности возникают возмущения в виде осесимметричных колебаний [20,21].

Осесимметричные колебания поверхности возникают, в первую очередь, из-за небольших колебаний гидростатического давления внутри струи. Появление колебаний гидростатического давления связано с частичным переходом кинетической энергии струи в потенциальную энергию давления.

⁴ Appendix 1

Этот переход вызывает появление внутри сечения струи силы F_y , действующей в радиальном направлении.

Противодействующая им сила F_σ поверхностного натяжения стремится вернуть поверхность в первоначальное положение. В результате их взаимодействия и возникают осесимметричные колебания.

По мере увеличения скорости истечения струи от значения v_{\min} точка зарождения колебаний поверхности струи смещается вверх по длине струи и все большая длина струи становится подверженной возмущениям (состояния IV, V).

Величина колебаний поверхности струи определяется значением скорости струи, поступающей в объём неподвижной жидкости и её вязкостью.

При достижении скорости движения свободной струи v_{cr} в результате появления радиальной силы F_y большей силы F_σ , начинается отрыв капель от поверхности струи, т.е. наблюдается ее разрушение (состояния VI и VII). Начало этого разрушения происходит в непосредственной близости от точки входа.

По мере увеличения скорости истечения сечение начала разрушения струи сдвигается вверх в сторону среза сопла.

С этого момента струя качественно меняет свою структуру и становится газожидкостной. Для человеческого глаза она представляет собой единое целое в виде слабо расширяющегося потока жидкости. Но это противоречит закону неразрывности жидкостного потока.

Расширение струи возможно только с уменьшением плотности жидкости, а такого явления при напорном истечении жидкости в атмосферу при нормальной температуре не происходит.

Это возможно увидеть только при условии срыва частиц жидкости с возмущенной поверхности струи.

В этом случае речь должна идти о газожидкостной струе с видимым диаметром d_J .

Это предположение нашло подтверждение в работах Дужего А.Б. и Тишина В.Б. [5; 15], которые исследовали структуру газожидкостной свободной струи электроконтактным методом.

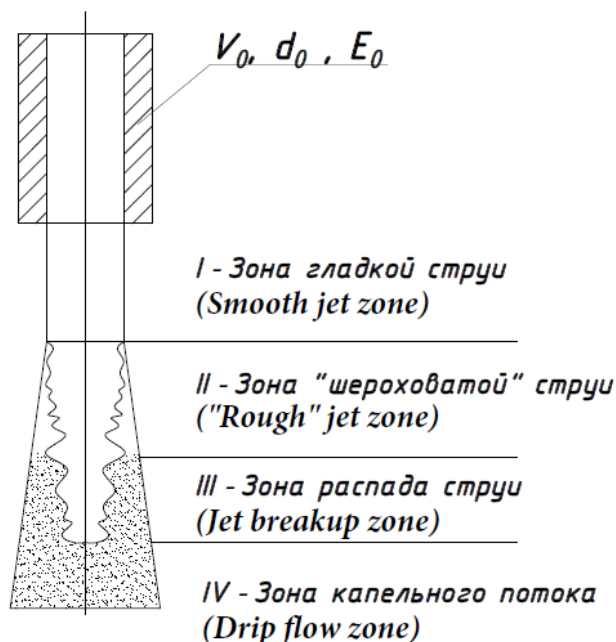


Рис. 3. Структура и форма свободной поверхности струи на бесконечно-большой длине, $v = \text{const}$ [1]⁵.

⁵ Appendix 1

На основании проведенных авторами экспериментов по изучению структуры свободных газожидкостных струй было установлено, что в состоянии VI структура струи представляет собой следующую модель: по оси газожидкостной струи движется основной поток жидкости, представляющий собой усеченный перевернутый конус. На каком-то расстоянии от среза сопла начинается отрыв капель от нее, которые движутся под некоторым углом к вертикальной оси. Вокруг жидкостного потока образуется, окружающий его газожидкостной слой, плавно расширяющийся по ходу движения.

Таким образом, жидкостная область газожидкостной струи плавно уменьшается в диаметре, по мере удаления рассматриваемого сечения от среза сопла, а газожидкостная область расширяется за счёт увеличения количества оторвавшихся капель и наличия радиальной составляющей скорости, а также уменьшения диаметра области чистой жидкости. Именно эта область, в основном, определяет количество газа, уносимого струей.

Дальнейшее увеличение скорости свободной газожидкостной струи приводит к смещению начала отрыва капель от струи в сторону среза сопла (состояния VII и VIII) заканчивающееся полным разрушением основного жидкостного потока на капли. Следует отметить, что кинетическая энергия капельного потока, пусть и компактного, существенно меньше энергии газожидкостной струи, что с точки зрения струйного уноса газа становится не практичным.

Эволюцию свободной поверхности струи бесконечно большой длины, можно проследить на примере истечения жидкости из сопла круглого поперечного сечения, представленного на рис. 3.

По состоянию поверхности струя может быть разбита на 4 характерные зоны по мере удаления потока от среза сопла:

- зона гладкой струи или зона ламинарной струи;
- зона шероховатой струи;
- зона разрушающейся струи;
- зона капельного потока.

Протяженность каждой из зон во многом зависит от скорости истечения жидкости из сопла. Чем больше скорость истечения, тем выше располагаются начала каждой из зон по отношению к срезу сопла. Более того, эти

зоны последовательно исчезают по мере увеличения скорости истечения, сначала зона гладкой струи, затем зона шероховатой струи и распад струй на капли начинается сразу, после выхода жидкости из сопла. Таким образом, следует ожидать, что в зависимости от скорости истечения жидкости из сопла, скорость уноса газа или расход газа, инжектируемого в трубы КСИА, будет следующим: сначала, при увеличении расхода жидкости через сопло от $v=0$ до $v=v_{\min}$, уноса газа не происходит по вышеупомянутым причинам.

Далее, при увеличении $v > v_{\min}$ начинается неравномерный унос малых количеств газа, переходящий к равномерному уносу газа, постоянно возрастающему с увеличением расхода жидкости Q_{Li} . Затем унос газа достигает своего максимального значения $Q_{g\max}$ и при дальнейшем увеличении Q_{Li} начинается уменьшение расхода Q_g .

Предполагается, что унос газа будет происходить в определенном диапазоне расходов жидкости, а именно, в диапазоне расходов от $Q_{Li} = Q_{Li\min}$ до $Q_{Li} = Q_{Li\max}$.

Количественные значения Q_g будут зависеть от диаметра проходного сечения сопла d_0 , определяющего скорость истечения жидкости из сопла.

Таким образом, можно предположить, как будет происходить унос газа жидкостными струями в верхней газовой камере КСИА. Очевидно, что унос газа будет начинаться не сразу после образования свободной струи, а при достижении ею скорости $v \geq v_{\min}$.

В отличие от уноса газа в неподвижный объём жидкости, в рассматриваемом случае свободная струя будет входить в объём жидкости, заполняющий опускную трубу.

Таким образом, можно предположить, что возмущения поверхности свободной струи будут меньше, чем в случае поступления её в неподвижный объём, а, следовательно, значение скорости струи v_{\min} будет несколько меньше. С другой стороны, унесенный свободной струей газ будет раздроблен на отдельные пузырьки, которые будут всплывать. Возникнет циркуляция газовой фазы в верхней части опускной трубы. Унесенный газ входит в объём жидкости, но

затем всплывает в виде газовых пузырьков и возвращается в газовую камеру. Этот процесс показан на рис. 4.

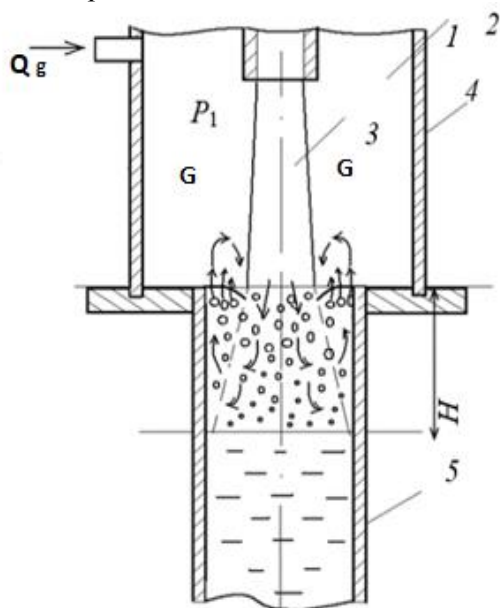


Рис. 4. Схематическое изображение верхней газовой камеры: 1- сопло, 2- верхняя (основная) газовая камера, 3- свободная струя, 4 - перегородка, 5 – опускная труба, G - газовая фаза⁶.

Отсюда следует ожидать, что показания приборов, фиксирующих расход подачи газовой фазы в верхнюю газовую камеру, будут нулевыми. Фиксация расхода газа начнется только тогда, когда пузырьки газа будут уноситься нисходящим потоком жидкости в подъемную трубу. Унос пузырьков газа будет возможен только в том случае, когда скорость всплывания пузырьков ω_b будет меньше приведенной скорости жидкости в опускной трубе ω_{Li} , которая в свою очередь, зависит от расхода жидкости через сопло. Связь между скоростью истечения v_0 и приведенной скоростью жидкости ω_{Li} в опускной трубе будет определяться соотношением, полученным из уравнения расхода для несжимаемой жидкости:

$$Q_{Li} = v_0 \cdot S_0 = \omega_{Li} \cdot S_{Pi} = const \quad (6)$$

Откуда:

$$\omega_{Li} = \frac{v_0 \cdot S_0}{S_{Pi}} = \frac{v_0 \cdot d_0^2}{d_{Pi}^2} \quad (7)$$

Скорость подъема одиночного пузыря во многом зависит от его размеров, физических свойств окружающей его жидкости и гидродинамической обстановки в рассматриваемом объеме жидкости.

Применительно к рассматриваемой задаче, определение размеров одиночных пузырей в условиях неинтенсивной работы аппарата, не имеет практического смысла.

Совокупное влияние размеров пузырей, их скорости всплывания и физических свойств жидкости на унос газа в условиях интенсивной работы КСИА отразится на уровне газосуспензионной смеси в опускной трубе КСИА, который определяется экспериментальным путем [9,22,23,24,25].

В свою очередь уровень газосуспензионной смеси будет определять длину свободной струи жидкости, которая влияет на унос газа [9,26,27]. Обработка результатов экспериментов по определению расхода воздуха Q_g , уносимого струей, в зависимости от диаметра сопел (d_0) выполнялась с помощью специализированных компьютерных программ. Результаты, проведенных экспериментов, в виде графических зависимостей представлены на рис. 5-8.

На рисунке 9 представлена зависимость уноса газа от концентрации измельченного солода. Математическая обработка данных представлена на примере обработки результатов, полученных при истечении свободной суспензионной струи из всех исследованных сопел в опускную трубу.

В процессе эксперимента неизбежно происходило нагревание суспензии, за счет диссипации механической энергии и перехода ее в тепловую энергию [28,29]. Во всех экспериментах с различными гидромодулями

этот нагрев фиксировался термометром 18 и составлял не более 5 °С.

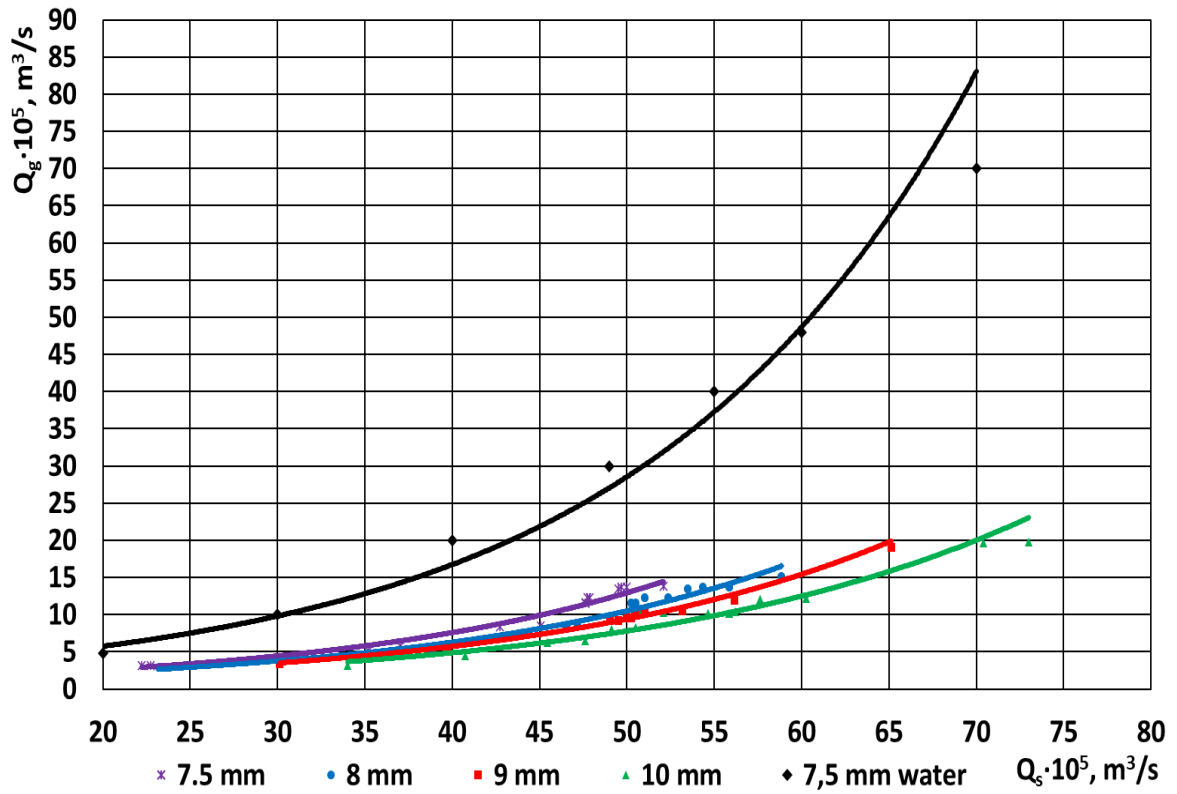


Рис. 5. Зависимость изменения Q_g от Q_c для различных диаметров сопел (гидромодуль 1:2,5)⁷

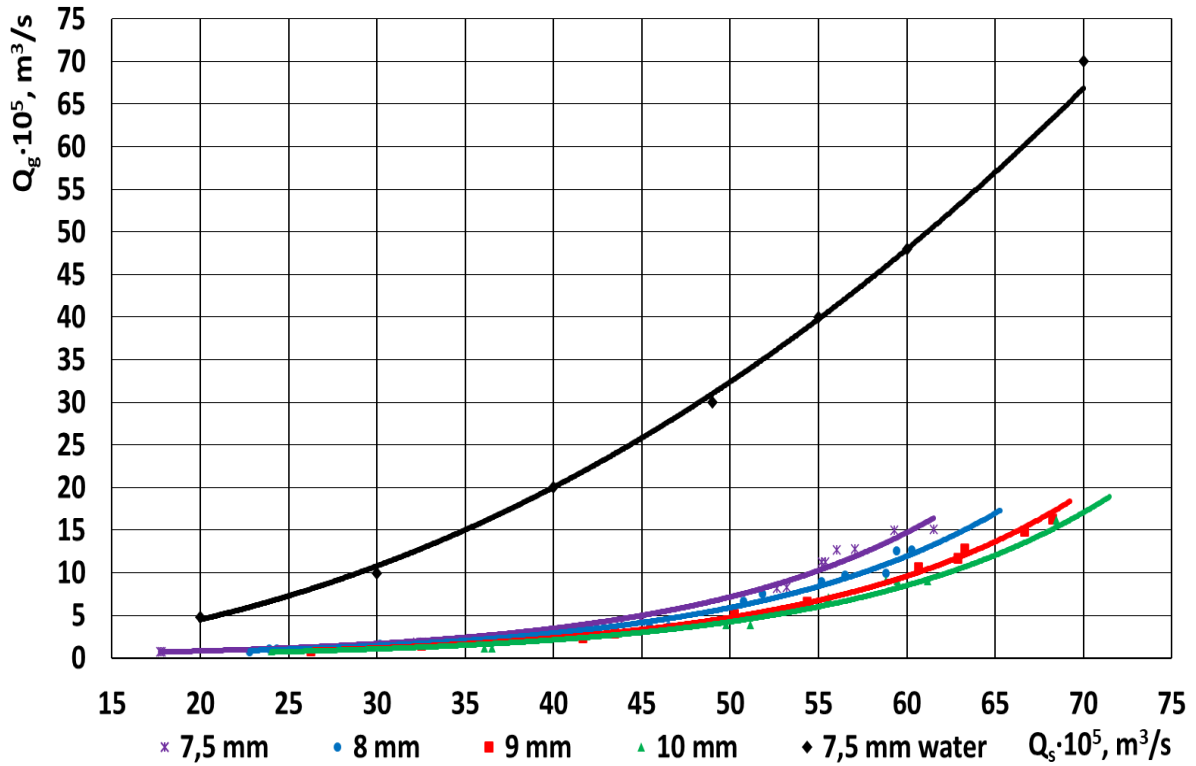


Рис. 6. Зависимость изменения Q_g от Q_c для различных диаметров сопел (гидромодуль 1:3)⁸

^{7,8} Appendix 1

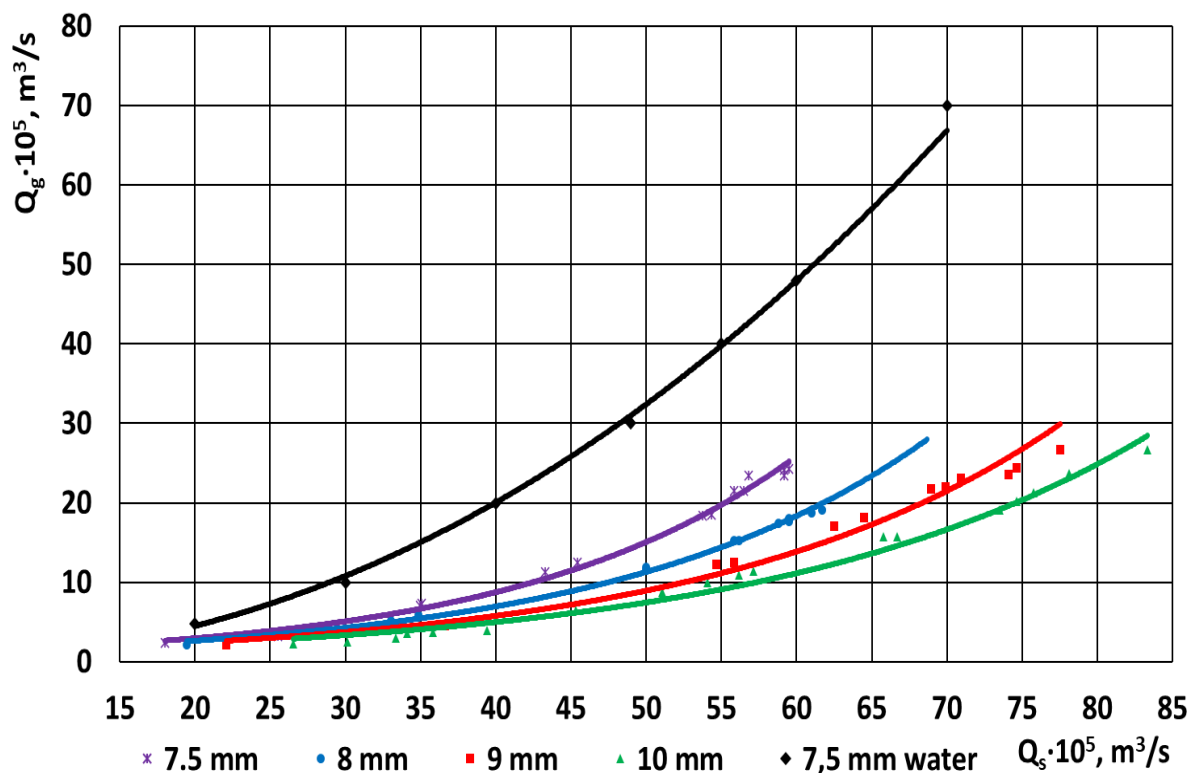


Рис. 7. Зависимость изменения Q_g от Q_c для различных диаметров сопел (гидромодуль 1:4)⁹

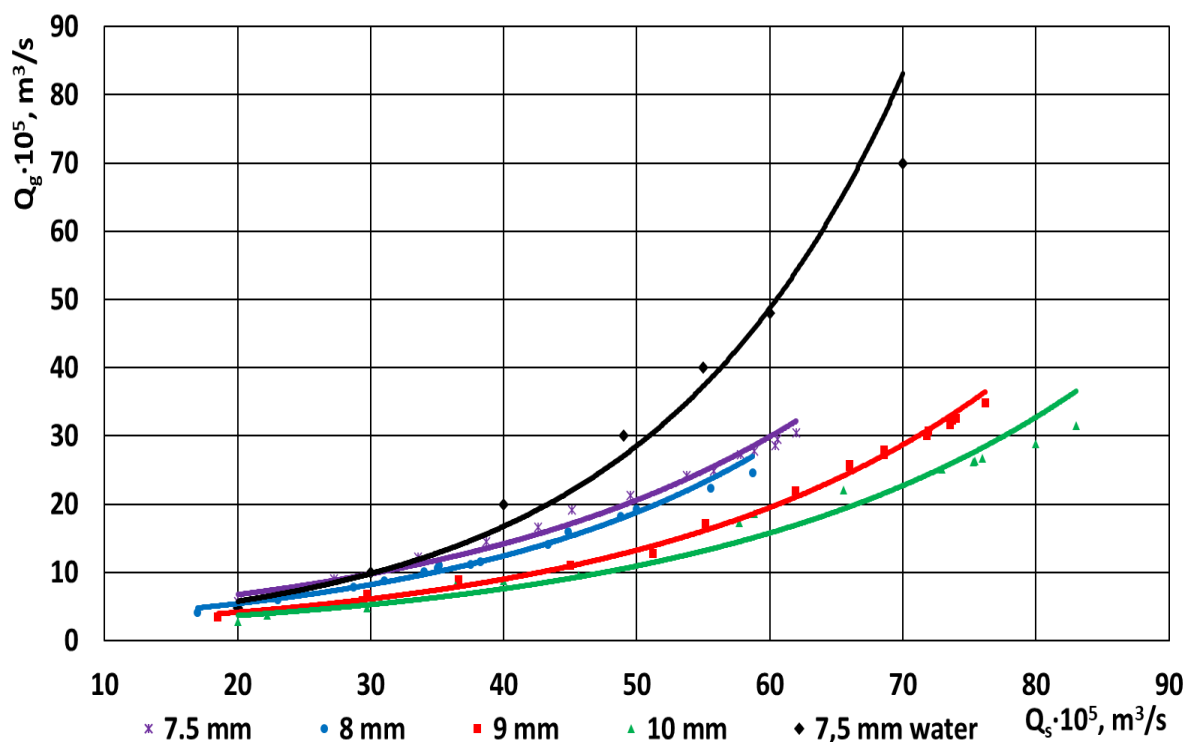


Рис.8. Зависимость изменения Q_g от Q_c для различных диаметров сопел (гидромодуль 1:6).¹⁰

^{9,10} Appendix 1

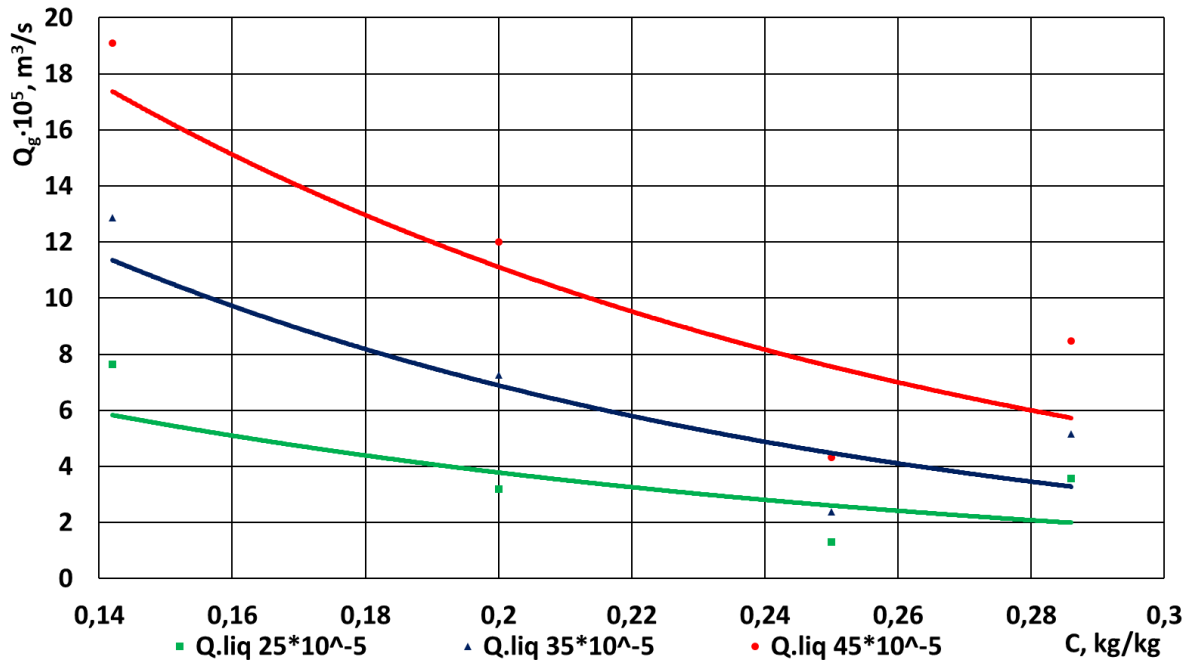


Рис. 9. Зависимость уноса газа свободной суспензионной струей от концентрации измельченного солода.¹¹

Значения коэффициентов динамической вязкости суспензионной смеси заданного гидромодуля в зависимости от температуры были получены в результате дополнительных реологических исследований. В таблице 2 представлена зависимость уноса газа от диаметра сопел.

Таблица 2¹²

Результаты обработки экспериментальных данных по уносу газовой фазы свободными струями солодовых суспензий при $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.¹³

d_0, mm	Гидромодуль (Hydromodulus)			
	1:2,5	1:3	1:4	1:6
7,5	$Q_g = 0,895 \cdot e^{0,05 \cdot Q_S}$	$Q_g = 0,195 \cdot e^{0,07 \cdot Q_S}$	$Q_g = 0,896 \cdot e^{0,056 \cdot Q_S}$	$Q_g = 3,20 \cdot e^{0,037 \cdot Q_S}$
8	$Q_g = 0,814 \cdot e^{0,05 \cdot Q_S}$	$Q_g = 0,175 \cdot e^{0,07 \cdot Q_S}$	$Q_g = 0,924 \cdot e^{0,05 \cdot Q_S}$	$Q_g = 2,360 \cdot e^{0,042 \cdot Q_S}$
9	$Q_g = 0,790 \cdot e^{0,05 \cdot Q_S}$	$Q_g = 0,142 \cdot e^{0,07 \cdot Q_S}$	$Q_g = 0,931 \cdot e^{0,045 \cdot Q_S}$	$Q_g = 1,916 \cdot e^{0,039 \cdot Q_S}$
10	$Q_g = 0,741 \cdot e^{0,05 \cdot Q_S}$	$Q_g = 0,132 \cdot e^{0,07 \cdot Q_S}$	$Q_g = 0,747 \cdot e^{0,045 \cdot Q_S}$	$Q_g = 1,760 \cdot e^{0,037 \cdot Q_S}$

ВЫВОДЫ

В данной работе представлено описание экспериментального стенда, позволяющего проводить исследования процесса инъекции газа струями водно-солодовых суспензий различной концентрации в зависимости от скорости их истечения.

Разработана методика измерения расхода воздуха, поступающего в КСИА за счет его инжектирования свободной струей водно-солодовой суспензии.

Предложенный экспериментальный стенд и описанная методика позволяют проводить исследования процесса инъекции газов для различных сред. Проведены

исследования по определению расхода воздуха, уносимого свободной струей, для нескольких гидромодулей водно-солодовых суспензий. В результате исследований установлены аналитические выражения для расчётов расхода воздуха, поступающего в КСИА, в зависимости от диаметра сопла, определяющего скорость истечения, и концентрации (вязкости) ВСС. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании КСИА для различных отраслей промышленности.

Также следует отметить, что указанный экспериментальный стенд позволяет провести исследования процессов диффузии различных газов в жидкости с различной концентрацией.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig.1.** Schematic representation of the experimental setup for the study of hydrodynamics (I – model of the jet–injection apparatus; II storage vessel; III – circulation pump; 1 downpipe, 2 – upper pipe; 3 – drain pipe; 4 – upper tube grid; 5 – top cover; 6 – lower tube grid; 7 – partition; 8 – quick connection nozzle; 9 – receiving chamber; 10 – upper circulation chamber; 11 – transitional channel; 12 gas meter; 13 – electromagnetic liquid flowmeter; 14 – control valve, 15 – drain valve; 16, 17 – differential liquid manometers; 18 – thermometer; 19 suspension supply line; 20 – air line, 21 – mm ruler.)

^{2,3}**Table 1.** Comparison of the values of the hydromodulus and the concentration of the solid phase in water

⁴**Fig. 2.** Change in the state of the free surface of the jet at its constant length as a function of the flow velocity v_0 .

⁵**Fig. 3.** Structure and shape of the free surface of the jet at infinitely long length, $v = \text{const}$

⁶**Fig. 4.** Schematic representation of the upper gas chamber: 1 - nozzle, 2 - upper (main) gas chamber, 3 - free jet, 4 - baffle, 5 - downpipe, G - gas phase

⁷**Fig. 5.** Dependence of change in Q_r on Q_c for different nozzle diameters (hydromodulus 1:2.5)

⁸**Fig. 6.** Dependence of change in Q_r on Q_c for different nozzle diameters (hydromodulus 1:3)

⁹**Fig. 7.** Dependence of change in Q_r on Q_c for different nozzle diameters (hydromodulus 1:4)

¹⁰**Fig. 8.** Dependence of change in Q_r on Q_c for different nozzle diameters (hydromodulus 1:6)

¹¹**Fig. 9.** Dependence of gas entrainment by the free suspension jet on the concentration of crushed malt

^{12,13}**Table 2.** Results of processing experimental data on gas phase entrainment by free jets of malt suspensions at $t = 25$ °C.

Литература (References)

- [1] Gulyaeva Y.N. *Issledovanie protsessa kul'tivirovaniya khlebopekarnykh drozhzhey pri usloviyakh vysokoy kontsentratsii biomassy v kozhukhotrubnom struyno-inzheksionnom fermentatore (KSIF)*. Diss. kand. tech. nauk. [Study of the cultivation process of baking yeast under conditions of high concentration of biomass in shell-and-tube jet-injection fermenter (KSIF). Ph.D. techn. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 1998. 153 p.
- [2] Darkov G.M. *Issledovanie kinetiki rosta chistoy kul'tury pivnykh drozhzhey v kozhukhotrubnom struyno-inzheksionnom apparate*. Diss. kand. techn. nauk. [The study of the growth kinetics of pure culture of beer yeast in shell-and-tube jet-injection fermenter. Ph.D. techn. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2002. 124 p.(in Russian).
- [3] Ibragimov T.S. *Sovershenstvovanie mashinno-apparurnoy skhemmy proizvodstva etilovogo spirta*. Diss. kand. tech. nauk. [Perfection of the machine-apparatus scheme of ethyl alcohol production. Ph.D. techn. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2014. 94 p.
- [4] Selevtsov A.L. *Izuchenie zakonomernostey oksidirovaniya rastitel'nykh masel v struynnykh techeniyach*. Diss. kand. tech. nauk. [Study of patterns of oxidation of vegetable oils in jet streams. Ph.D. techn. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2000. 139 p.
- [5] Duzhiy A.B. *Issledovanie protsessa inzheksii gaza svobodnymi zhidkimi struyami v kozhukhotrubnom struyno-inzheksionnom absorbere dlya proizvodstva pishevykh produktov*. Diss. kand. tech. nauk. [Research of gas injection by free liquid jets in a shell-and-tube jet absorber for food production. Ph.D. techn. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2001. 136 p.
- [6] Pranit M. Patil, Amol P. Yadav, Dr. P. A. Patil. [Comparative Study between Heat Transfer through Laminar Flow and Turbulent Flow]. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2015, no. 4. Available at: http://www.ijirset.com/upload/2015/april/76_Comparative-1.pdf. (Accessed 15.04.2023).
- [7] Molana, M., Banooni, S. [Investigation of Heat Transfer Processes Involved Liquid Impingement Jets: A Review]. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2013, no. 03, pp. 413-435. Available at: <https://www.scielo.br/bjce/a/JjxLF3TjD5X3Qrr8TsQTmZb/?format=pdf&lang=en>. (Accessed 15.04.2023).
- [8] Xu, Q., Liu, W., Li, W., Yao, T., Chu, X., Guo, L. [Numerical investigation on thermal hydraulic characteristics of steam jet condensation in subcooled water flow in pipes]. *International Journal of Heat and Mass*

- Transfer*, 2022, vol. 184. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122277](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122277).
- [9] Agaev K.E. *Sovershenstvovanie gidrodinamicheskikh protsessov obrabotki pishhevogo syr'ya v kozhotrubnom struyno-inzhetsionnom apparate*. Diss. kand. tech. nauk. [Perfection of hydrodynamic processes of food raw materials processing in shell-and-tube jet-injection apparatuses. Ph.D. techn. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2012. 148 p.
- [10] Blaznov A.N. *Issledovanie i razrabotka absorbtentov na osnove zhidkostno-gazovykh struynykh apparatov s udlinnoy kameroy smesheniya*. Abstract Diss. kand. tech. nauk. [Research and development of absorbers based on liquid-gas jet apparatuses with an elongated mixing chamber. Abstract Ph.D. techn. sci. diss.]. Biysk, 2001, 24 p.
- [11] Sivenkov A.V. *Intensifikatsiya gidrodinamicheskikh protsessov v struynykh apparatakh pishvoy promyshlennosti*. Diss. kand. tech. nauk. [Intensification of hydrodynamic processes in jet apparatuses of food industry. Ph.D. techn. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2011. 148 p.
- [12] Shakouchi, T., Kito, M., Tsuda, M., Tsujimoto, K., Ando, T. Flow and Heat Transfer of Impinging Jet from Notched-Orifice Nozzle. *Journal of Fluid Science and Technology*, 2011, vol. 6, pp. 453–464. doi: [10.1299/jfst.6.453](https://doi.org/10.1299/jfst.6.453).
- [13] A.M. Cervantes-Alvarez, Y.Y. Escobar Ortega, A. Sauret, F. Pacheco-Vazquez. Air entrainment and granular bubbles generated by a jet of grains entering water. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2020, vol. 574, pp. 285-292. doi: [10.1016/j.jcis.2020.04.009](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.04.009).
- [14] L.-S Fan, R Lau, C Zhu, K Vuong, W Warsito, X Wang, G Liu Evaporative liquid jets in gas-liquid-solid flow system. *Chemical Engineering Science*. 2001, vol. 56, pp. 5871-5891. doi: [10.1016/S0009-2509\(01\)00283-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(01)00283-4).
- [15] Tishin V.B. *Intensifikatsiya protsessov v gazozhidkostnykh plastinchatykh i kozhukhotrubnykh apparatakh pishvoy i milrobiologicheskoy promyshlennosti*. Diss. dokt. techn. nauk. [Intensification of processes in gas-liquid plate and shell-and-tube apparatuses of food and microbiological industries. Dr. techn. sci.]. Saint-Petersburg, 1998. 412 p.
- [16] Blenke H. Loop reactors. *Advances in biochemical engineering*. 2006, vol. 13, pp. 121-214. doi: [10.1007/3540094687_8](https://doi.org/10.1007/3540094687_8).
- [17] Novoselov A.G., Sorokin S.A., Baranov I.V., Martyushev N.V., Rumiantceva O.N., Fedorov A.A. Comprehensive Studies of the Processes of the Molecular Transfer of the Momentum, Thermal Energy and Mass in the Nutrient Media of Biotechnological Industries. *Bioengineering*, 2022, vol. 9, no. 1, pp. 18. doi: [10.3390/bioengineering9010018](https://doi.org/10.3390/bioengineering9010018).
- [18] Mc Keogh E.j, Elsayw E.M. Measurements of air entrainment by vertical plunging liquid jets. *Experiments in Fluids*, 2002, vol. 32, no. 6, pp. 624-638. doi: [10.1007/s00348-001-0388-1](https://doi.org/10.1007/s00348-001-0388-1).
- [19] Mc Keogh E.J., Ervine D.A. Air entrainment rate and diffusion pattern of plunging liquid jets. *Chemical Engineering Science*, 1981, vol. 36, no. 7, pp. 1161-1172. doi: [10.1016/0009-2509\(81\)85064-6](https://doi.org/10.1016/0009-2509(81)85064-6).
- [20] Mc Carthy M.J., Molloy N.A. Review of stability of liquid jets and the influence of nozzle design. *The Chemical Engineering Journal*, 1974, vol. 7, pp. 1-20. doi: [10.1016/0300-9467\(74\)80021-3](https://doi.org/10.1016/0300-9467(74)80021-3).
- [21] Ohkawa A., Kusabarak D., Kawai I., Sakai N., Endoh K. Some flow characteristics of a vertical liquid jet system having downcomers. *Chemical Engineering Science*, 1986, vol. 41, no. 9, pp. 2347-2361. doi: [10.1016/0009-2509\(86\)85085-0](https://doi.org/10.1016/0009-2509(86)85085-0).
- [22] Ohkawa A., Kusabarak D., Sakai N. [Effect of nozzle length on gas entrainment characteristics of vertical liquid jet]. *Chemical Engineering Science*, 1987, vol. 20, no. 3, pp. 295-299. Available at: https://www.jstage.jst.go.jp/article/cej1968/20/3/20_3_295/_pdf/-char/en. (Accessed 15.04.2023).
- [23] Bin A.K. Minimum air entrainment velocity of vertical plunging liquid jets. *Chemical Engineering Science*, 1988, vol. 43, no. 2, pp. 379-389. doi: [10.1016/0009-2509\(88\)85051-6](https://doi.org/10.1016/0009-2509(88)85051-6).
- [24] Liang Hu, Hanghang Xu, Mingbo Li, Weiting Liu, Wenyu Chen, Haibo Xie, Xin Fu. Liquid jet formation during a suspended liquid suction process. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2020, vol. 114, doi: [10.1016/j.expthermflusci.2019.109952](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.109952).
- [25] Shuichiro Miwa, Takahiro Moribe, Kohei Tsutsumi, Takashi Hibiki. Experimental investigation of air entrainment by vertical plunging liquid jet. *Chemical Engineering Science*, 2018, vol. 181, pp. 251-263, doi: [10.1016/j.ces.2018.01.037](https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.01.037).
- [26] Henry Z. Kister, Garry Jacobs, Abraham A. Kister. Gas entrainment by liquid jets and cascades can unsettle towers. *Chemical Engineering Research and Design*, 2023, vol. 191, pp. 313-318, doi: [10.1016/j.cherd.2023.01.039](https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.01.039).
- [27] Bongliba T Sangtam, Subrata Kumar Majumder. Entrainment characteristic of liquid-liquid dispersion in a jet-driven mixing column: Substantial for process intensification in liquid-liquid extraction. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 2020, vol. 153, doi: [10.1016/j.cep.2020.107927](https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107927).

- [28] Bharath Kumar Goshika, Subrata Kumar Majumder. Entrainment and holdup of gas-liquid-liquid dispersion in a downflow gas-liquid-liquid contactor. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 2018, vol. 125, pp. 112-123, doi: [10.1016/j.cep.2018.01.011](https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.01.011).
- [29] Bharath Kumar Goshika, Subrata Kumar Majumder. Dispersion of liquid-liquid phase by a jet-induced gas-liquid-liquid mixing column developed for separation of organic pollutants. *Separation Science and Technology*, 2019, vol. 54, doi: [10.1080/01496395.2018.1504796](https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1504796).

- [30] M. Opletal, P. Novotny, V. Linek, T. Moucha, M. Kordac. Gas suction and mass transfer in gas-liquid up-flow ejector loop reactors. Effect of nozzle and ejector geometry. *Chemical Engineering Journal*, 2018, vol. 353, pp. 436-452, doi: [10.1016/j.cej.2018.07.079](https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.07.079).
- [31] Tong Li, A-Man Zhang, Shi-Ping Wang, Shuai Li, and Wen-Tao Liu. Bubble interactions and bursting behaviors near a free surface. *Physics of Fluids*, 2019, vol. 31, doi: [10.1063/1.5088528](https://doi.org/10.1063/1.5088528)

Сведения об авторах.



Малахов Юрий Леонидович
 Университет ИТМО,
 аспирант
 E-mail: yuri.malakhov@kersia-group.com
 Область научных интересов:
 пищевая безопасность,
 процессы и аппараты
 пищевых производств



Новоселов Александр Геннадьевич.
 Университет ИТМО,
 профессор, д.т.н.
 E-mail: agnovoselov@itmo.ru
 Область научных интересов:
 процессы тепло-массообмена



Кузнецов Александр Юрьевич
 Университет ИТМО,
 аспирант
 E-mail: sasha_2731@mail.ru
 Область научных интересов:
 процессы тепло-массообмена



Чеботар Анастасия Викторовна
 Университет ИТМО, к.т.н.
 E-mail: avchebotar@itmo.ru
 Область научных интересов:
 процессы и аппараты пищевых производств



Баранов Игорь Владимирович
 Университет ИТМО,
 профессор, д.т.н.
 E-mail: barigor@mail.ru
 Область научных интересов:
 теплофизические свойства
 продуктов



Румянцева Ольга Николаевна
 Университет ИТМО, доцент
 к.т.н.
 Область научных интересов:
 холодильная технология
 пищевых продуктов
 E-mail: rumyantseva@itmo.ru



Миронова Дарья Юрьевна
 Университет ИТМО, доцент,
 к.э.н.
 E-mail: mironova@itmo.ru
 Области научных интересов:
 промышленный симбиоз,
 управление инновациями