

УДК 621.928.37

МАТВИЕНКО ОЛЕГ ВИКТОРОВИЧ, докт. физ.-мат. наук, профессор,
matvolegv@mail.ru

БАЗУЕВ ВИКТОР ПАВЛОВИЧ, ст. научный сотрудник,
stroylab-70@mail.ru

ВЕНИК ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ, зав. лабораторией,
stroylab-70@mail.ru

СМИРНОВА НАТАЛЬЯ ГЕННАДЬЕВНА, инженер,
stroylab-70@mail.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАВИТАЦИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

В работе рассматриваются результаты экспериментального исследования возникновения кавитации и структуры ее течения в кавитационно-смесительном диспергаторе лабораторной установки при различных расходах жидкости. При этом в выходном патрубке в связи с его прозрачностью можно наблюдать структуру потока жидкости в период образования кавитации и ее стабилизации, что позволяет правильно подойти к качественному получению битумных эмульсий путем кавитационно-смесительного диспергирования.

Ключевые слова: битум; кавитация; давление; турбулентность; закрутка; вязкая жидкость.

OLEG V. MATVIENKO, DSc, Professor,
matvolegv@mail.ru

VICTOR P. BAZUEV, Senior Research Scientist,
slab@mail.tomsknet.ru,

VLADIMIR N. VENIK, Head of Laboratory,
slab@mail.tomsknet.ru

NATALYA G. SMIRNOVA, Engineer,
slab@mail.tomsknet.ru

Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

EXPERIMENTAL STUDY OF CAVITATION IN DIFFERENT APPARATUSES

The paper presents the experimental research of cavitation and the structure of its flow in the laboratory cavitation mixing disperser at different flow rates. Due to the transparence of the outlet fitting, the structure of the liquid flow can be observed during the formation and stabilization of cavitation. It allows the appropriate preparation of bitumen suspensions using the principle of cavitation mixing dispersing.

Keywords: bitumen; cavitation; pressure; turbulence; swirl flow; viscous liquid.

Для приготовления битумных эмульсий используются технологические устройства, различающиеся между собой принципом действия, конструктивными условиями. Существующие в настоящее время установки для приготовления эмульсий как отечественного, так и зарубежного производства отличаются сложностью изготовления, эксплуатации и высокой стоимостью. Поэтому становится актуальной задача разработки эффективного и экономически выгодного способа изготовления битумных эмульсий без ухудшения их свойств.

В работах [1–8] проведен цикл теоретических исследований процессов течения и модифицирования битумов в технологических устройствах.

В статье [1] приведены теоретические исследования по математическому моделированию процессов модифицирования битумов в кавитационно-смесительном диспергаторе (КСД) с целью их практического применения, повышения качества нового вяжущего и снижения энергозатрат при его приготовлении. Показано, что способ кавитационно-смесительного диспергирования позволяет получить однородную смесь на выходе из кавитационно-смесительного диспергатора.

В работе [2] исследован процесс модификации битумов в инжекторном смесителе. Изучено влияние геометрических и режимных параметров, интенсивности закрутки потока на характеристики смешения. Приведенный анализ показывает, что наилучшего смешения можно добиться в сильно закрученном потоке при расположении инжектора в непосредственной близости от завихрителя.

В работе [3] построена модель движения пузырька в закрученном потоке неньютоновской жидкости. Изучено влияние физических характеристик жидкости и скорости ее движения на динамику пузырька, что дает возможность оптимизировать процесс вспенивания битума, улучшая его свойства.

В работе [4] исследовано влияние закрутки на процессы турбулизации и реламинаризации потока битумных вяжущих в технологических устройствах для производства новых материалов для дорожного строительства. Установлено, что с возникновением зоны возвратных течений появление турбулентных пульсаций в окрестности оси затруднено вследствие консервативного характера воздействия центробежной силы на параметры турбулентности в этой части потока. Вследствие этого в ядре потока сохраняется ламинарный режим течения.

В работе [5] проведено исследование особенностей течения и характеристик тепломассопереноса турбулизированной сильновязкой битумно-дисперсной среды при течении в охлаждаемом канале в прямоточном и закрученном потоках. Расчеты показывают, что тепло, возникающее в потоке вследствие трения, может оказывать значительное влияние на условия теплообмена со стенкой. Распределение эффективной вязкости потока на термически и гидродинамически нестабилизированном участке течения определяется не только ростом молекулярной вязкости при охлаждении потока, но и процессами турбулизации (реламинаризации) течения.

В работе [6] исследован процесс образования кавитационных пузырьков в кавитационно-смесительном диспергаторе. Установлено, что формирование зоны кавитации осуществляется в области пережима канала, где происходит

значительное увеличение скорости потока и, соответственно, уменьшение давления. Проведенные расчеты показали, что для рассматриваемых режимных условий оптимальное пережатие, обеспечивающее устойчивое существование зоны кавитации, лежит в диапазоне. С повышением температуры происходит увеличение размеров кавитационной зоны. При температуре жидкости, близкой к температуре кипения (K), кавитационная зона локализуется не только в области пережатия канала, но и распространяется вниз по потоку, занимая достаточно большую часть кавитационно-смесительного диспергатора.

В работе [7] рассматриваются результаты исследования структуры течения и смешения двух коаксиальных закрученных потоков вязкой жидкости для приготовления битумных дисперсных систем. Анализ поля течения позволяет сделать вывод, что наибольшего качества смешения можно добиться путем организации в потоке рециркуляционной зоны, в которую будут вовлечены оба потока. Для потоков с соотношением среднерасходных скоростей это достигается при совместной сонаправленной закрутке.

В работе [8] разработана физико-математическая модель и выполнен расчет распада струи битума в спутном закрученном потоке водной фазы. Показано, что рост закрутки потока приводит к интенсификации турбулентности в потоке и, следовательно, способствует более быстрому распаду струи. При этом становится более энергетически выгодным формирование капель меньшего размера.

В монографии [9] рассмотрены структуры битумов и битумных дисперсных систем, пути улучшения их свойств для создания более качественных битумных вяжущих для применения их в дорожном строительстве в различных климатических условиях. Разработаны математические модели течения закрученных потоков битумных вяжущих в трубах и каналах, возникновения кавитации, а также математические модели модифицирования битумов и получения битумных эмульсий в кавитационно-смесительном диспергаторе.

Проведенные теоретические исследования позволили прийти к выводу о возможности применения принципа кавитационно-смесительного диспергирования для получения битумных эмульсий на вязких битумах различной концентрации.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования процесса кавитации водной фазы в кавитационно-смесительном диспергаторе.

Устройства и оборудование для изучения возникновения кавитации

Для исследования возникновения кавитации в турбулентных потоках, а также принципа смешения различных жидкостей разработан многофункциональный кавитационно-смесительный диспергатор КСД (рис. 1). Конструкция КСД состоит из улиточного завихрителя 1 с входящими патрубками 2, расположенными диаметрально противоположно по касательной к наружной окружности внутренней плоскости корпуса. Патрубки расположены так, чтобы вихревое движение жидкости по внутренней плоскости корпуса было направлено в одну сторону.

К улиточному завихрителю 1 с открытой стороны внутренней полосы завихрителя крепится с помощью болтов фланец 3 с выходным патрубком 4

и соединительным фланцем 5. При этом для наблюдения процессов, возникающих при движении жидкости, фланец и выходной патрубок выполнены из прозрачного материала и отшлифованы. В центре глухой задней части улиточного завихрителя расположен входной штуцер 6 для возможности введения в центр вихревого потока КСД дополнительных жидкостей.

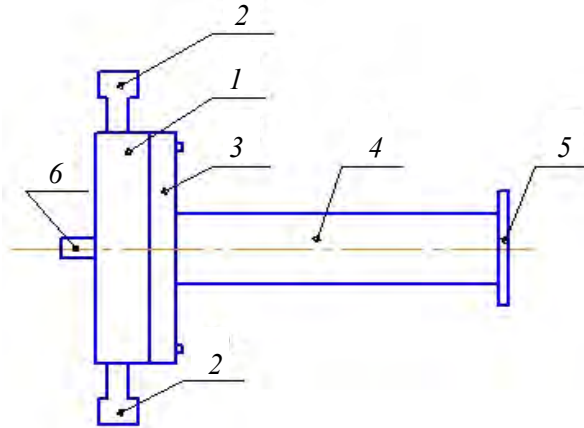


Рис. 1. Схема кавитационно-смесительного диспергатора:

1 – улиточный завихритель; 2 – выходные патрубки; 3 – входной фланец; 4 – выходной патрубок; 5 – соединительный фланец; 6 – входной штуцер

На рис. 2 приведена схема лабораторной установки для изучения и моделирования образования кавитационных пузырьков и их схлопывания при различных расходах жидкости. Лабораторная установка работает следующим образом. Жидкость из емкости 1 центробежным насосом 2 подается под давлением по трубопроводам к регулировочным кранам К2 и К4, установленным на корпусе улиточного завихрителя (кавитационно-смесительного диспергатора КСД-3), и крану К5 для свободного слива. Входные патрубки на корпусе улиточного завихрителя расположены диаметрально противоположно касательной к окружности внутренней полости завихрителя для создания потоков жидкости в одном направлении. Выходной патрубок с фланцем КСД выполнен из органического стекла для возможности визуального наблюдения за процессами образования кавитационных пузырьков и их схлопывания, а также процессов смешения различных жидкостей. При запуске установки краны К2 и К4 закрыты, кран К5 открыт, и жидкость циркулирует через трубопроводы на слив в емкость 1. Открывая краны К2 и К4 попеременно или вместе и закрывая кран К5 свободного слива, можно изменять расходы жидкости, подаваемой в улиточный завихритель, наблюдая за процессами, происходящими в выходном патрубке КСД. В задней части корпуса улиточного завихрителя расположен патрубок – тройник с вакуумметром 4, трубопроводом к емкости 5 с краном К3. По показаниям вакуумметра можно наблюдать изменения давления в центре вихревой воронки жидкости, создаваемой улиточным завихрителем при различных режимах подаваемой жидкости. Емкость 5

с краном К3 предназначена для изучения смешения различных жидкостей с жидкостью, подаваемой в улиточный завихритель КСД, при этом процесс можно визуально наблюдать в выходном патрубке.

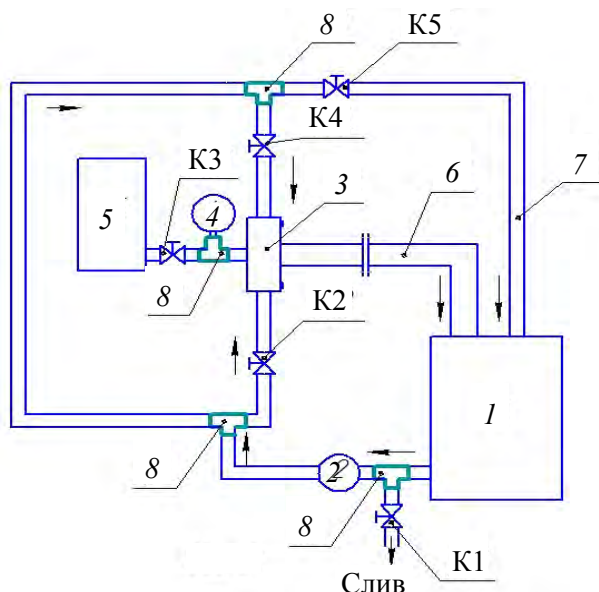


Рис. 2. Гидравлическая схема лабораторной установки:

I – емкость для воды $V = 70$ л; 2 – насос; 3 – кавитационно-смесительный диспергатор с прозрачным фланцем и выходной трубой; 4 – вакуумметр; 5 – емкость для диспергирующей жидкости $V = 10$ л; 6 – выходной патрубок кавитационно-смесительного диспергатора; 7 – трубопровод свободного слива; 8 – тройник; K1–K5 – запорные вентили

Исследование влияния расхода жидкости на вихревое движение в КСД

Разработанная лабораторная установка позволяет наблюдать вихревое движение жидкости и возникновение турбулентных потоков с образованием кавитационных пузырьков в интервалах расходов жидкости в пределах $0,2\text{--}1,0$ л/с при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, проходящей через улиточный завихритель и выходной патрубок. Соотношение ограниченного контура L вихревого потока улиточного завихрителя и вихревого контура L_1 выбрано в пределах $2,5\text{--}1$ опытным путем. При этом истечение жидкости из выходного патрубка происходит через решетку противодавления, установленную между фланцами выходного патрубка и трубы слива. Изменяя расходы жидкости, проходящей через улиточный завихритель, можно изменять форму вихревого движения, условия возникновения кавитационных пузырьков и их схлопывания. Подавая жидкость насосом в улиточный завихритель и регулируя ее расход в пределах $0,2\text{--}0,25$ л/с, можно наблюдать в выходном патрубке следующую картину (рис. 3). На выходе из улиточного завихрителя 1 в выходном патрубке 4 образуется вихревая трубка, а в начале выходного патрубка появляется множество пузырьков, которые схлопываются на решетке противодавления.



Рис. 3. Вихревое движение жидкости в выходном патрубке КСД при расходе 0,25 л/с и барометрическом давлении в центре улиточного завихрителя – 0,004 МПа

Снижение барометрического давления в центре улиточного завихрителя незначительно (рис. 4).



Рис. 4. Разряжение в центре улиточного завихрителя 0,004 МПа при расходе жидкости 0,25 л/с

Дальнейшее увеличение расхода жидкости, проходящей через улиточный завихритель, до 1 л/с приводит к существенному снижению барометрического давления от $-0,05$ до $-0,06$ МПа в центре вихревой воронки улиточного завихрителя (рис. 5) и изменению вихревого движения в выходном патрубке. Вихревая трубка изменяет свои размеры и переходит в вид вихревой воронки, которая располагается уже в улиточном завихрителе, а в выходном патрубке образуется множество кавитационных пузырьков (кавитационная зона), пред-

ставляющих собой вихрь, при этом, по мере приближения к решетке противодавления, они начинают схлопываться (рис. 6).



Рис. 5. Барометрическое давление в зоне вихревой воронки КСД и давление на стенке улиточного завихрителя при расходе 1 л/с



Рис. 6. Вихревое движение жидкости в выходном патрубке КСД при расходе 1 л/с и барометрическом давлении в центре вихревой воронки улиточного завихрителя от $-0,05$ до $-0,06$ МПа

При схлопывании кавитационного пузырька возникает ударная волна, а при схлопывании множества кавитационных пузырьков образуется фронт ударных волн, которые передаются на выходной патрубок. Для визуального наблюдения за возникающими ударными волнами на выходном патрубке был установлен датчик, состоящий из пьезоэлектрического преобразователя (пьезоэлемент ЦТС-23), который посредством кабеля соединен с осциллографом С-33. Фронт ударных волн на осциллографе фиксировался с длительностью 1 мкс.

Осциллограмма откликов ударных волн на стенке выходного патрубка КСД при схлопывании кавитационных пузырьков, фиксируемая пьезоэлектрическим датчиком с длительностью фронта 1 мкс при температуре $T = 293$ К,

приведена на рис. 7. Прохождение ударных волн при схлопывании кавитационных пузырьков сопровождается щелчками и резким изменением барометрического давления в центре вихревой воронки улиточного завихрителя в пределах от $-0,05$ до $-0,06$ МПа.

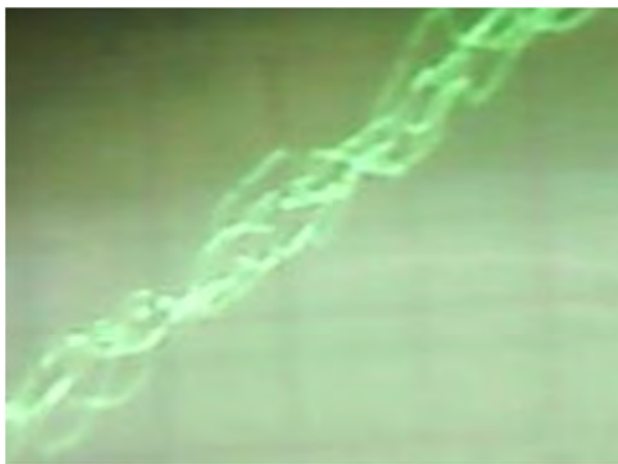


Рис. 7. Осциллограмма откликов ударных волн на стенке выходного патрубка КСД при схлопывании кавитационных пузырьков, фиксируемая пьезоэлектрическим датчиком с длительностью фронта 1 мкс при температуре $T = 293$ К

Дальнейшие наблюдения за поведением вихревых потоков жидкости в вихревом патрубке улиточного завихрителя были проведены с применением гидродинамических устройств, установленных консольно на решетке противодавления.

Исследования проводились при применении различных типов гидродинамических устройств: пластинчатого, трубчатого и звездообразного.

Наиболее интересную картину вихревых потоков жидкости удалось наблюдать при использовании звездообразного гидродинамического вибратора (рис. 8).

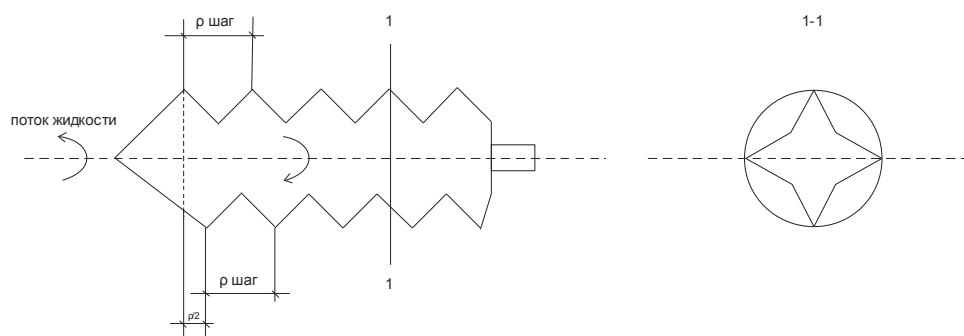


Рис. 8. Звездообразное гидродинамическое устройство с обратным шагом воздействия вращения

Звездообразное гидродинамическое устройство выполнено в виде резьбы цилиндрической звезды с шагом p , при этом направление резьбы противоположно вихревому круговому движению жидкости.

В начальной стадии при запуске кавитационно-смесительного диспергатора на выходе из улиточного завихрителя в выходной трубке происходит беспорядочное вихревое движение водно-воздушной смеси (рис. 9).



Рис. 9. Вихревое неустановившееся движение жидкости в выходном патрубке

Это обусловлено тем, что при начальной стадии в подводящих трубках имеется большое количество воздуха, который, смешиваясь с жидкостью, создает в КСД такую картину. С течением времени, когда происходит полное удаление воздуха из трубопровода, изменяется вид вихревого движения жидкости в выходном патрубке (рис. 10), где ясно наблюдается возникновение и рост кавитационных пузырьков на выходе из улиточного завихрителя в выходном патрубке, их уменьшение и схлопывание в районе звездообразного с обратным шагом гидродинамического устройства.



Рис. 10. Установившееся вихревое движение жидкости в выходном патрубке

Образование и рост кавитационных пузырьков происходит за счет количества газов, растворимых в жидкости, при барометрическом атмосферном давлении. В дальнейшем идет снижение барометрического давления до $-0,09$ МПа в центре улиточного завихрения и уменьшения зоны возникновения и схлопывания кавитационных пузырьков (рис. 11, 12).



Рис. 11. Вихревое движение жидкости в выходном патрубке при барометрическом давлении $-0,09$ МПа в центре вихревой воронки улиточного завихрителя



Рис. 12. Барометрическое давление $-0,09$ МПа в зоне вихревой воронки улиточного завихрителя

Лабораторная установка позволяет исследовать и наблюдать процессы смешивания с жидкостью, проходящей через кавитационно-смесительный диспергатор и при введении в центр улиточного завихрителя другой жидкости. Для этого была выбрана водно-дисперсная краска, которая заполнялась в емкость 5 и через K_3 подавалась в центр улиточного завихрителя. В процессе

введения водно-дисперсной краски на выходе из улиточного завихрителя в выходном патрубке наблюдалась равномерно окрашенная жидкость, что говорит об эффективности кавитационно-смесительного диспергатора как устройства для смешивания различных жидких сред и получения качественных дисперсных систем (рис. 13).



Рис. 13. Смешение различных жидкостей в выходном патрубке КСД

Проведенные исследования позволили прийти к выводу о возможности применения принципа кавитационно-смесительного диспергирования (КСД) для получения битумных эмульсий на битумах различной концентрации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Базуев, В.П. Моделирование процесса модифицирования битума в кавитационно-смесительном диспергаторе / В.П. Базуев, О.В. Матвиенко, В.Л. Вороненко // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2010. – № 4. – С. 121–128.
2. Исследование процесса модификации битума в инжекторном смесителе / О.В. Матвиенко, В.П. Базуев, Н.Г. Туркасова [и др.] // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 3. – С. 202–213.
3. Матвиенко, О.В. Исследование динамики пузырька в закрученном потоке нелинейно-вязкой жидкости / О.В. Матвиенко, М.В. Агафонцева, В.П. Базуев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 4. – С. 144–156.
4. Матвиенко, О.В. Численное исследование перехода к турбулентному режиму течения внутренних закрученных потоков битумных вязущих / О.В. Матвиенко, В.П. Базуев, Н.К. Южанова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 2. – С. 132–143.
5. Численное исследование структуры течения и теплообмена при течении битумно-дисперсных систем в цилиндрических каналах / О.В. Матвиенко, В.П. Базуев, Н.К. Дульзон [и др.] // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 2. – С. 80–93.
6. Численное исследование процесса образования кавитационных пузырьков в смесительном устройстве / О.В. Матвиенко, В.П. Базуев, В.Н. Веник, Н.Г. Смирнова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 4. – С. 231–245.

7. Исследование смешения коаксиальных закрученных потоков для приготовления битумных дисперсных систем / О.В. Матвиенко, В.П. Базуев, Н.Г. Смирнова, Г.В. Пушкарева, Н.К. Дульзон // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 3. – С. 123–134.
8. Численное моделирование распада турбулентной струи в спутном закрученном потоке / О.В. Матвиенко, А.К. Эфа, В.П. Базуев, Е.В. Евтюшкин // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2006. – Т. 49. – № 6. – С. 96–107.
9. Матвиенко, О.В. Математические модели производственных процессов для приготовления битумных дисперсных систем: монография / О.В. Матвиенко, Ф.Г. Унгер, В.П. Базуев. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2015. – 336 с.

REFERENCES

1. Bazuev V.P., Matvienko O.V., Voronenko V.L. Modelirovaniye protsessa modifitsirovaniya bituma v kavitatsionno-smesitel'nom dispergatore [Modeling of bitumen modification in a cavitation mixing dispersing agent]. *Vestnik TSUAB*. 2010. No. 4. Pp. 121–128. (rus)
2. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Turkasova N.G., Baigulova A.I. Issledovanie protsessa modifikatsii bituma v inzhektor'nom smesitele [Investigation of bitumen modification in injector mixer]. *Vestnik TSUAB*. 2013. No. 3. Pp. 202–213. (rus)
3. Matvienko O.V., Agafontseva M.V., Bazuev V.P. Issledovaniye dinamiki puzyrka v zakruchennom potoke nelineynno-vyazkoy zhidkosti [Bubble dynamics in a swirl flow of nonlinear viscous fluid]. *Vestnik TSUAB*. 2012. No. 4. Pp. 144–156. (rus)
4. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Yuzhanova N.K. Chislennoe issledovanie perekhoda k turbulentnomu rezhimu techeniya vnutrennykh zakruchennykh potokov bitumnykh vyazhushchikh [Computational investigation of internal swirl flows of asphalt binders transitioned to a turbulent flow]. *Vestnik TSUAB*. 2013. No. 2. Pp. 132–143. (rus)
5. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Dul'zon N.K., Smirnova N.G., Agafonova M.V. Chislennoe issledovanie struktury techeniya i teploobmena pri techenii bitumno-dispersnykh sistem v tsilindricheskikh kanalakh [Numerical investigation of flow structure and heat exchange of swirl flows of dispersed bitumen system in cylindrical channels]. *Vestnik TSUAB*. 2014. No. 2. Pp. 80–93. (rus)
6. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Smirnova N.G. Chislennoe issledovanie protsessa obrazovaniya kavitatsionnykh puzyr'kov v smesitel'nom ustroystve [Numerical calculation of cavitation bubbles in mixing disperser]. *Vestnik TSUAB*. 2014. No. 4. Pp. 231–245. (rus)
7. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Smirnova N.G., Pushkareva G.V., Dul'zon N.K. Issledovanie smesheniya koaksial'nykh zakruchennykh potokov dlya prigotovleniya bitumnykh dispersnykh sistem [A study of mixing coaxial swirl flows for preparation of asphalt dispersion systems]. *Vestnik TSUAB*. 2014. No. 3. Pp. 123–134. (rus)
8. Matvienko O.V., Efa A.K., Bazuev V.P., Evtyushkin E.V. Chislennoe modelirovaniye raspada turbulentnoi strui v sputnom zakruchennom potoke [Numerical modeling of turbulent jet disintegration in concurrent swirl flow]. *Russian Physics Journal*. 2006. 49, No. 6. Pp. 96–107. (rus)
9. Matvienko O.V., Unger F.G., Bazuev V.P. Matematicheskie modeli proizvodstvennykh protsessov dlya prigotovleniya bitumnykh dispersnykh sistem: monografiya [Mathematical models of manufacturing processes for preparation of bitumen dispersed systems. Monograph]. Tomsk : TSUAB Publ., 2015. 336 p. (rus)