

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПОТОКА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ СТРУИ ВЯЗКОГО ТОПЛИВА В МОДЕЛЬНОМ РЕЗЕРВУАРЕ

Э.В. Шамсутдинов

Исследовательский центр проблем энергетики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Казанского научного центра Российской академии наук, д. 2/31, ул. Лобачевского, а/я 190, 420111, г. Казань, Россия, eshamsutd.kazan@mail.ru

Аннотация

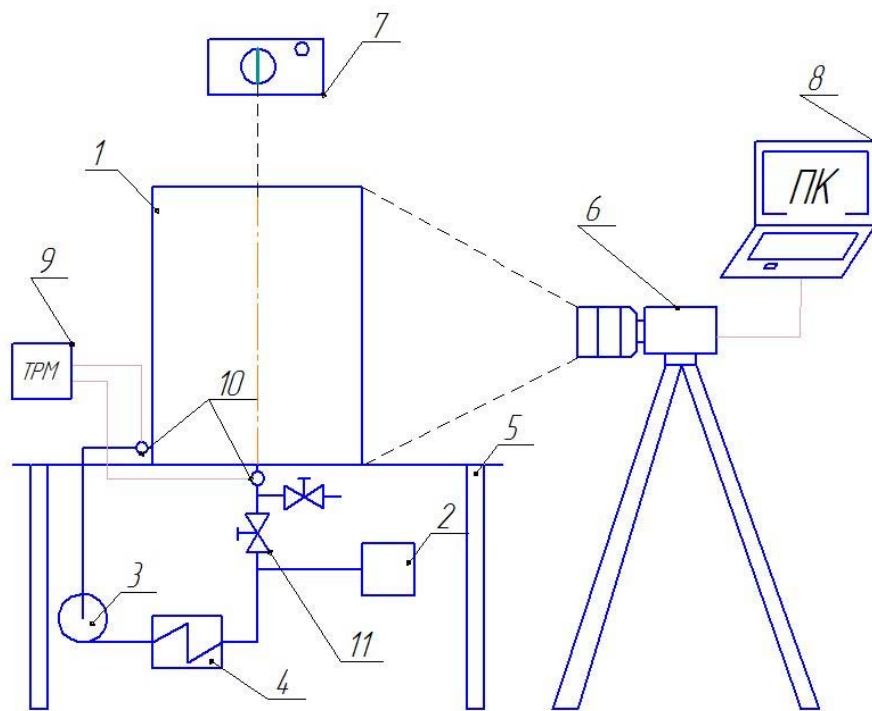
Мазут широко используется на большинстве объектов промышленной или стационарной теплоэнергетики в качестве резервного или растопочного топлива. Необходимость периодического подогрева мазута в резервуарах хранения требует оценки влияния процессов тепломассообмена с учетом реологических особенностей топлива на эффективность его разогрева. Если в области теоретических исследований процессов гидродинамики и теплообмена имеется большое количество работ, проведение натурального эксперимента сдерживается сложностью его проведения на промышленных котельных, тепловых станциях и нефтебазах. В докладе представлены результаты визуализации струйного течения вязкой жидкости в модельном резервуаре хранения топлива.

Введение

Необходимость исследований обусловлена широким использованием мазута в качестве резервного или растопочного вида топлива на большинстве объектов промышленной или стационарной теплоэнергетики. При этом затраты энергии на работу систем хранения и подготовки жидкого органического топлива занимают весьма ощутимую долю от собственных нужд котельных, станций или нефтебаз [1]. Все это в совокупности обуславливает высокую долю затрат на топливо в структуре себестоимости получаемой потребителем тепловой и электрической энергии и диктует необходимость разработки энергосберегающих мероприятий при эксплуатации данных систем. Существующая до настоящего времени нормативно-техническая документация, посвященная вопросам эксплуатации систем хранения и подготовки жидкого органического топлива, базируется на интегральных характеристиках. Необходимость периодического подогрева мазута в процессе его хранения в резервуарах с учетом реологических особенностей топлива требует моделирования и исследования процессов тепломассопереноса для оценки их влияния на эффективность разогрева мазута в резервуарах, эксплуатируемых на промышленных котельных, ТЭС и нефтебазах. Если в области теоретических исследований данного процесса имеется большое количество работ [2], то проведение экспериментальных исследований сдерживается сложностью проведения натурального эксперимента.

Основная часть

С целью исследования гидродинамических процессов создана установка по визуализации течения при струйном течении вязкой жидкости в модельном резервуаре, принципиальная схема и общий вид которого приведены на рис.1.



а)



б)

Рис. 1. Принципиальная схема (а) и общий вид (б) экспериментального стенда визуализации течения вязкой жидкости в модельном резервуаре

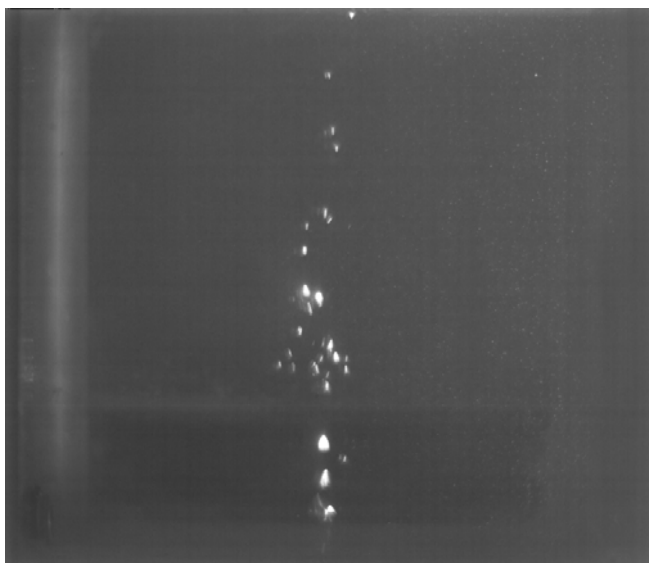
Принцип работы экспериментального стенда следующий. Рабочая среда из емкости (поз. 1), через отверстие в боковой стенке, по трубопроводу выкачивается насосом (поз. 3), прогоняется через проточный нагреватель (поз. 4) и подается обратно в емкость (поз.1), через отверстие в центре днища. Компрессором (поз. 2), через капилляр, в поток жидкости нагнетаются пузырьки воздуха. Прожектором (поз. 7) создается «световой нож», который высвечивает плоскость, проходящую через ось емкости. Перпендикулярно высвечиваемой плоскости установлена скоростная фотокамера Fastec Imaging HiSpec 2G mono (поз. 6), которая с частотой 100 кадров в секунду производит съемку исследуемой области. Получившиеся изображения передается на компьютер (поз. 8), где сохраняются в виде файла с расширением AVI. Термопреобразователями сопротивления (поз. 10) осуществляется контроль за температурой на входе и выходе из емкости, показания с которых поступает на измеритель (поз. 9). Расход жидкости регулируется углом открытия задвижки (поз. 11). Калибровка расхода осуществляется до проведения основного эксперимента замером расхода жидкости (при изменении физических свойств жидкости калибровка повторяется). В качестве модельной рабочей среды использован водный раствор глицерина с различной его различной массовой долей (концентрацией). В ходе эксперимента для 60% раствора глицерина (динамическая вязкость $\mu = 19 \cdot 10^{-3}$ Па·с) расход жидкости Q изменяется от $3,6 \cdot 10^{-5}$ до $20,9 \cdot 10^{-3}$ м³/с; для 70% раствора глицерина (динамическая вязкость $\mu = 40 \cdot 10^{-3}$ Па·с): $6,9 \cdot 10^{-5} < Q < 24,8 \cdot 10^{-3}$ м³/с. Варьируемые в ходе эксперимента параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1

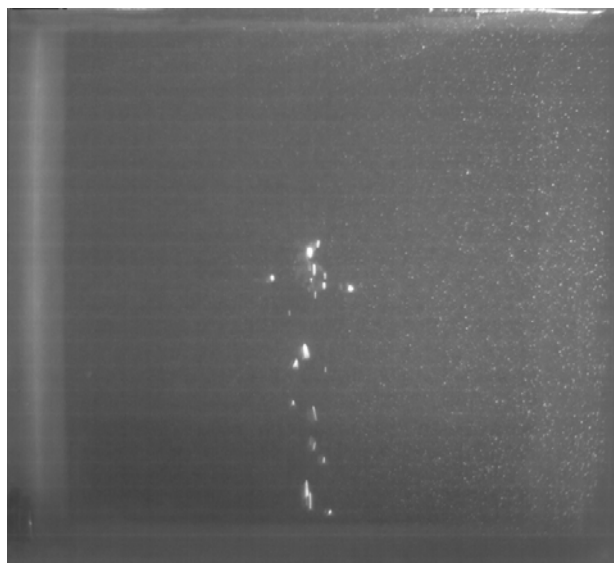
Варьируемые параметры

Массовая доля глицерина, %	Динамическая вязкость $\mu \cdot 10^{-3}$, Па·с	Плотность глицерина ρ , кг/м ³	Диаметр форсунки d , м	Расход жидкости $Q \cdot 10^{-5}$, м ³ /с	Скорость потока на выходе из насадки $w \cdot 10^{-1}$, м/с	Число Re
60	19	1157	0,018	20,9	8,2	902
				13,8	5,4	596
				8,3	3,3	358
				3,6	1,4	155
70	40	1185		24,8	9,8	520
				17,1	6,7	358
				10,2	4,0	214
				6,9	2,7	144

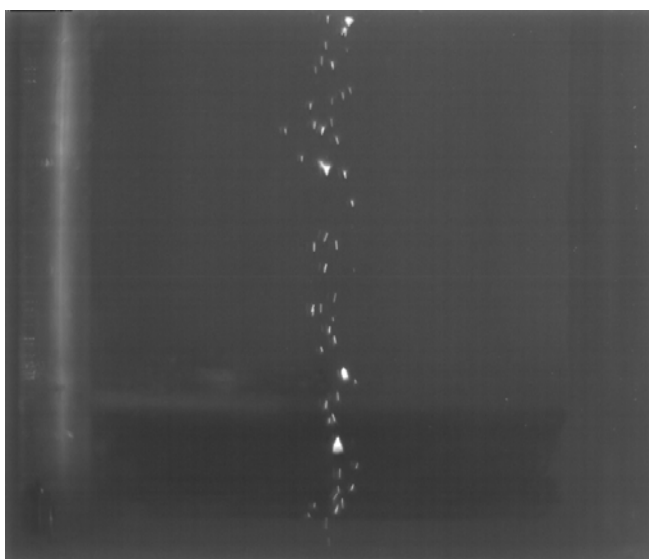
Как показали исследования, при малых расходах и, соответственно, малых числах Re наблюдается низкая интенсивность процесса перемешивания (рис.2). Таким образом, для малых расходов топлива в случае его разогрева в резервуаре процесс естественной конвекции будет преобладать над вынужденной.



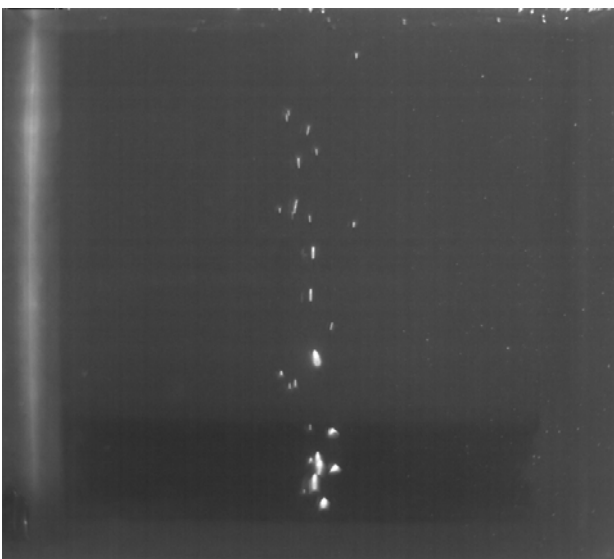
60% раствор глицерина, $Re = 155$, $t=1c$



70% раствор глицерина, $Re = 144$, $t=1c$



60% раствор глицерина, $Re = 155$, $t=24c$



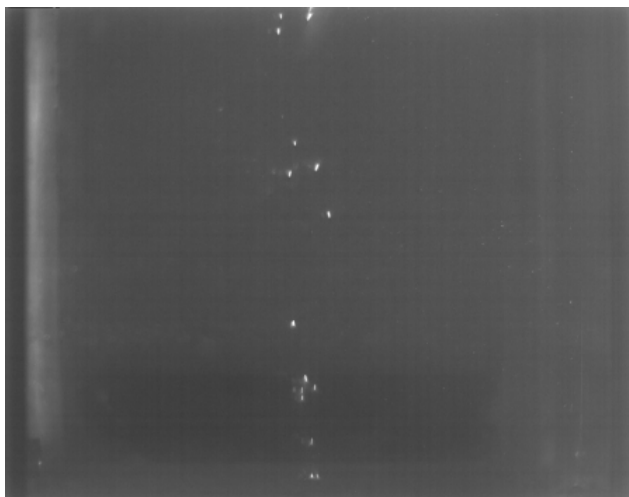
70% раствор глицерина, $Re = 144$, $t=24c$

Рис. 2. Результаты визуализации течения раствора глицерина в зависимости от времени исследуемого процесса t при $Re < 160$

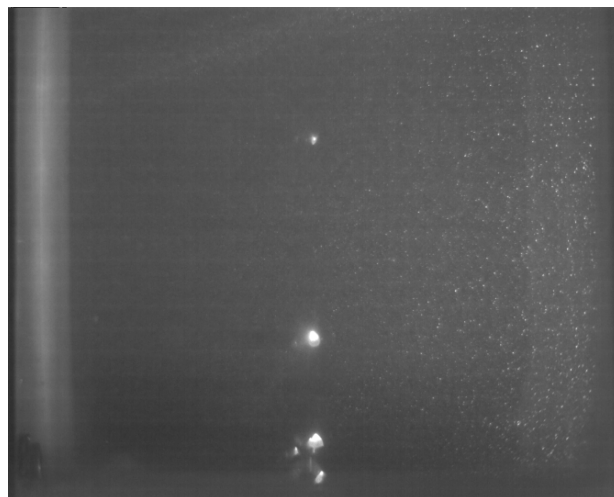
На рисунках 3 – 5 представлены результаты визуализации для $Re = 358$, 520 и 596 в различные моменты времени эксперимента.

Из рисунков видна тенденция перераспределения полей вектора скорости, состоящая в выравнивании величины и направления вектора скорости по мере распространения струи вверх по модельному резервуару. Связано это с тем, что при удалении струи от сопла насадки, т.е. с развитием течения, происходит уменьшение модуля вектора скорости вдоль основного направления движения потока жидкости и его рост на периферии струи. Это

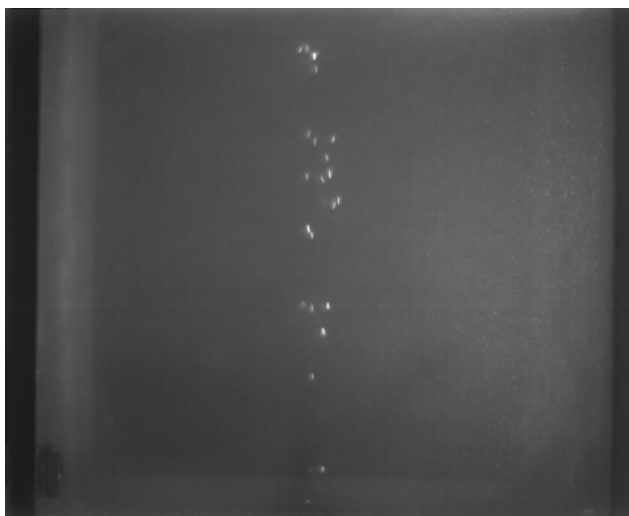
объясняется тем, что струя увлекает за собой часть окружающей неподвижной жидкости и переносит ее в направлении своего движения. Таким образом, с увеличением расстояния ширина струи возрастает, а модуль вектора скорости на оси струи уменьшается. Падение модуля вектора скорости на оси струи также объясняется воздействием гравитационных и массовых сил, действующих на струю со жидкости, находящейся в модельном резервуаре.



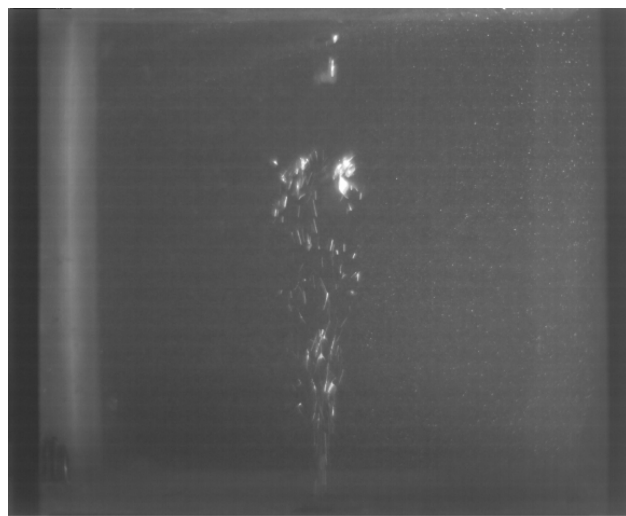
60% раствор глицерина, $Re = 358$, $t = 0,5c$



70% раствор глицерина, $Re = 358$, $t = 1,15c$



60% раствор глицерина, $Re = 596$, $t = 0,5c$

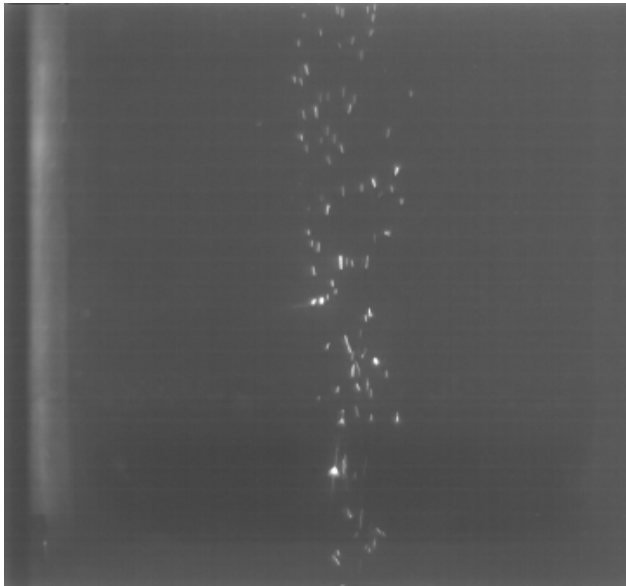


70% раствор глицерина, $Re = 520$, $t = 1,15c$

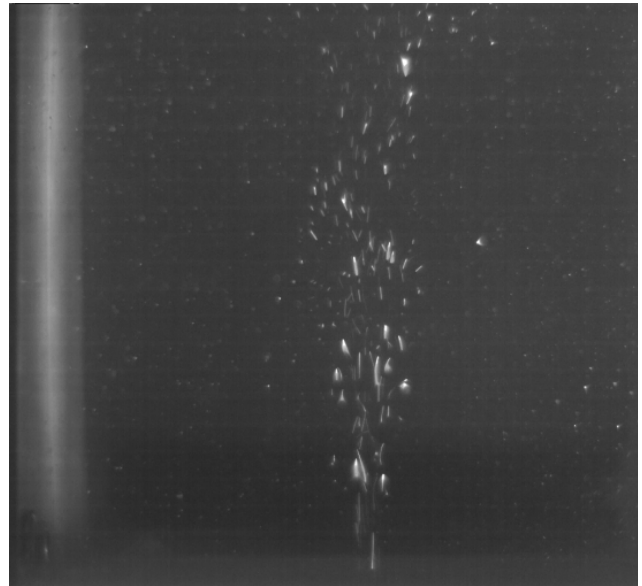
Рис. 3. Результаты визуализации в начальный момент времени исследуемого процесса t при $Re > 160$

Из рисунков 3 - 5 видно, что элементарные объемы жидкости испытывают вращение вправо. При этом возникает область, где направление движения меняется на противоположное, т.е. область, где элементарные объемы жидкости или не испытывают вращения, или испытывают небольшое вращение в противоположную сторону. Таким образом наблюдается тенденция образования возвратных течений, которая практически не наблюдается при малых числах Re .

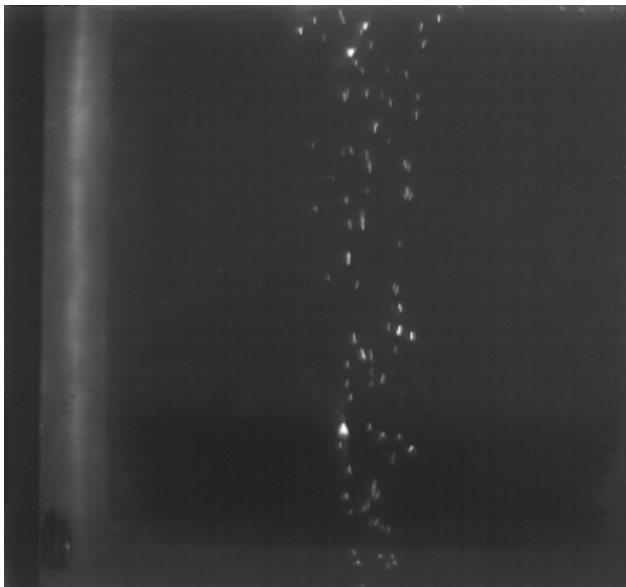
С ростом числа Re (в нашем случае при $Re = 358$) в некоторый момент времени начинает возникать возвратное течение жидкости. Далее возвратное течение не исчезает, а приобретает устойчивый характер для установившегося процесса при времени проведения эксперимента $t \rightarrow \infty$. Наличие возвратных течений предполагает в этом случае наличие застойных зон. Особенно ярко выраженные возвратные течения образуются при еще больших значениях Re (в нашем случае $Re = 520, 596$). Даже в средней области течения траектории движения частиц сравнительно быстро меняют направление движения на противоположное.



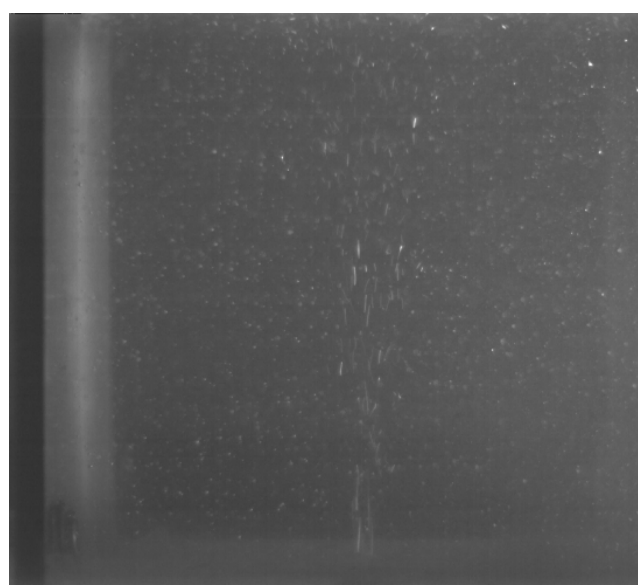
60% раствор глицерина, $Re = 358, t = 23c$



70% раствор глицерина, $Re = 358, t = 23c$



60% раствор глицерина, $Re = 596, t = 24,5c$

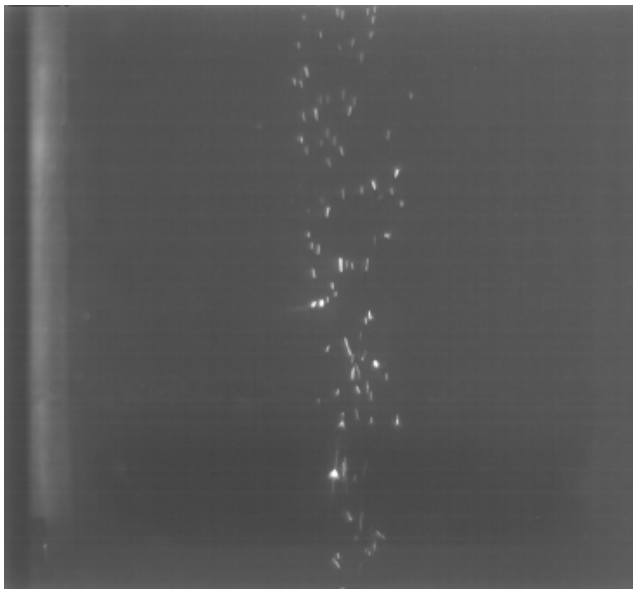


70% раствор глицерина, $Re = 520, t = 24,5c$

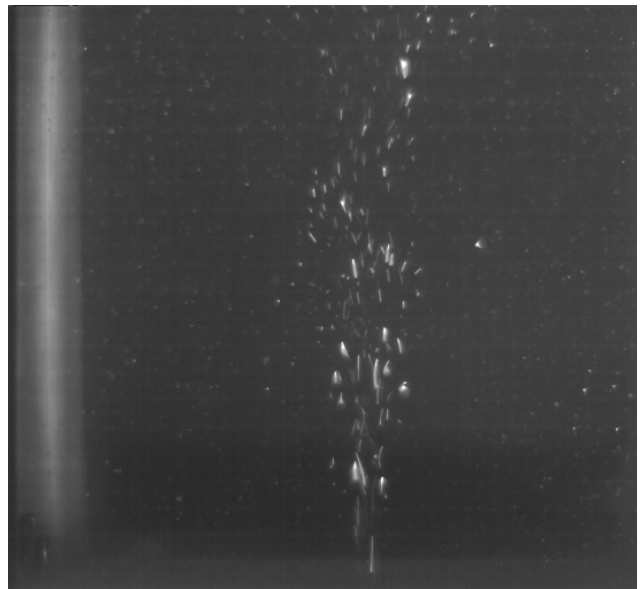
Рис. 4. Результаты визуализации при развитии течения при $Re > 160$

Таким образом, при числах $350 < Re < 600$ начинают возникать обширные зоны возвратного течения, так называемые «застойные зоны», которые будут являться «барьером» для вынужденной конвекции в процессе разогрева вязких сред в резервуарах.

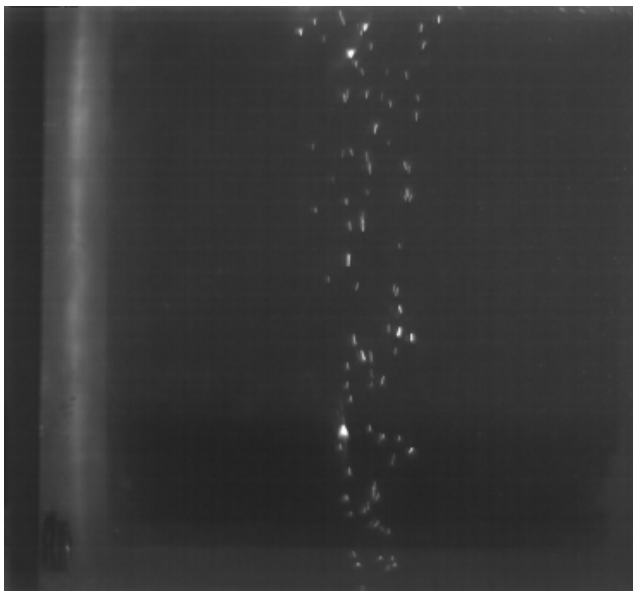
Особенно это заметно для 70% водного раствора глицерина. Объясняется это ярко выраженным влиянием вязкости: вследствие более высокой вязкости происходит более интенсивное трение жидкости струи со слоями покоящейся в первоначальный момент жидкости в резервуаре.



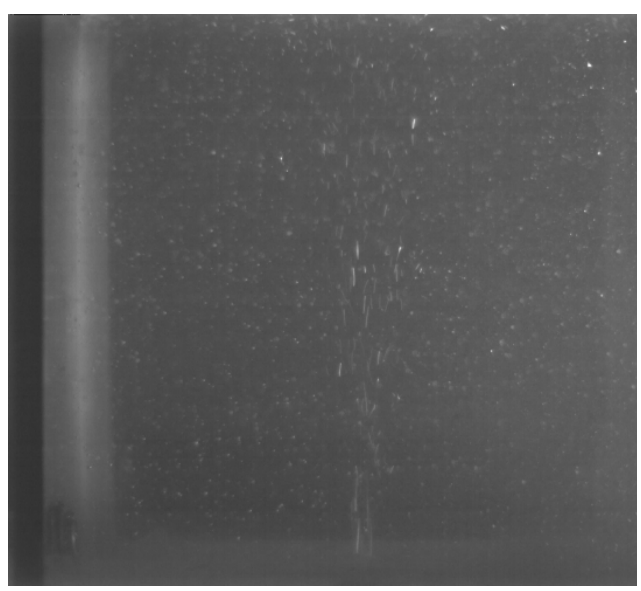
60% раствор глицерина, $Re = 358$, $t = 46$ с



70% раствор глицерина, $Re = 358$, $t = 46$ с



60% раствор глицерина, $Re = 596$, $t = 49$ с



70% раствор глицерина, $Re = 520$, $t = 49$ с

Рис. 5. Результаты визуализации в конечный момент времени исследуемого процесса t при $Re > 160$

Как видно из результатов визуализации, наибольшие напряжения сдвига наблюдаются в области, близкой к краю сопла насадки. Это говорит о том, что наибольшая интенсивность возможного теплопереноса между нагретой средой, поступающей из коллектора, и более «холодной» жидкостью, находящейся в резервуаре, наблюдается в его придонной области. Этим и объясняется, что в техническом исполнении коллекторы, отводящие, например подогретый мазут к потребителю, располагаются именно на дне резервуара. Это позволяет, при необходимости, в случае аварийной или нештатной ситуации, достаточно быстро обеспечить подачу топлива.

Заключение

При малых расходах и, соответственно, малых числах Re наблюдаются интенсивность процесса перемешивания низкая. Таким образом, для малых расходов процесс естественной конвекции будет преобладать над вынужденной.

При числах $350 < Re < 600$ начинают возникать обширные зоны возвратного течения, так называемые «застойные зоны», которые будут являться «барьером» для вынужденной конвекции в процессе разогрева вязких сред в резервуарах. Особенно это заметно для 70% водного раствора глицерина. Объясняется это ярко выраженным влиянием вязкости: вследствие более высокой вязкости происходит более интенсивное трение жидкости струи со слоями покоящейся в первоначальный момент жидкости в резервуаре.

С увеличением расходов (числа Re) независимо от процентного состава водного раствора глицерина происходит интенсификация процесса перемешивания, что, естественным образом, благоприятно скажется на процесс вынужденной конвекции при разогреве вязких сред в резервуарах.

Литература

1. Назмеев Ю.Г. Мазутные хозяйства ТЭС. М.: Издательство МЭИ, 2002. 612 с.
2. Назмеев Ю.Г. Теплоперенос и гидродинамика в системах хранения жидкого органического топлива и нефтепродуктов. М.: Издательский дом МЭИ, 2005. 368 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракты №02.740.11.0753, №02.740.11.0685, №П1014 в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы) и РФФИ (гранты №12-08-97041-р_поволжье_а, №12-08-97055-р_поволжье_а)