

УДК 665.75

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА ПОДАЧИ СТРУЙ НА ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ЦИРКУЛЯЦИОННОМ ПОДОГРЕВЕ МАЗУТА В ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ЁМКОСТЯХ

Э. В. Шамсутдинов

Лаборатория моделирования систем производства энергии Исследовательского центра проблем энергетики Казанского научного центра Российской академии наук, Казань, Россия

Наиболее распространённым способом подогрева вязких сред, таких как мазут или другие органические топлива, на данный момент является циркуляционный способ подогрева. Большинство органических топлив представляют собой сильно вязкие среды, процессы конвективного теплообмена в которых лимитируются наличием ламинарного пограничного слоя и характеризуются сравнительно небольшими коэффициентами теплоотдачи. При циркуляционном способе подогрева предварительно разогретая в стационарных подогревателях среда поступает в резервуары или другие ёмкости через насадки различного конструктивного исполнения и пространственного расположения. Пространственное расположение насадок, обеспечивающих подачу разогретой рабочей среды, оказывает существенное влияние на гидродинамическую структуру струйных течений и, как следствие, на теплообменные процессы, надёжность и экономичность работы энергетического оборудования в целом. В связи с вышесказанным становится очевидным необходимость исследования закономерностей процессов теплообмена при циркуляционном подогреве жидких топлив и нефтепродуктов в резервуарах при различных вариантах расположения насадок, как весьма актуальной проблемы.

В литературе известно немало работ, посвящённых вопросам гидродинамики и теплообмена струйных течений сред с различными теплофизическими свойствами. К сожалению, большинство этих работ посвящены исследованию теплообмену при струйных течениях невязкой сжимаемой жидкости. Если же рассматривается вязкая несжимаемая среда, то изучение теплообменных процессов производится на базе теории пограничного, ламинарного или турбулентного пограничного слоя [1, 2].

В настоящей работе используется модель вязкой несжимаемой среды, а для описания процессов гидродинамики и теплообмена используется система фундаментальных уравнений термомеханики сплошной среды – уравнения движения и неразрывности и переноса энергии. При построении математической модели используется двумерная постановка, что на практике соответствует случаю, когда исследуется теплообмен при циркуляционном подогреве вязкой жидкости в ёмкостях и резервуарах прямоугольной конструкции с линиями одинаковых в конструктивном исполнении и близко расположенных насадок подачи разогретой жидкости вдоль одного из габаритных размеров. В силу симметрии задачи в качестве области течения рассматривается ограниченная область двумерного пространства, представляющая собой половину сечения прямоугольного резервуара плоскостью xOz . В качестве основных допущений выбраны следующие [3]: нестационарность процессов теплообмена обусловлена нестационарностью температуры T и расхода мазута G , поступающего в резервуар; теплофизические свойства мазута как плотность ρ , теплоёмкость c_p и теплопроводность λ меняются в ходе разогрева мазута незначительно; кинематическая вязкость мазута зависит от его температуры T : $\nu = \nu(T)$; объёмные силы, влияющие на процесс разогрева мазута, являются силами тяжести; геометрия течения и граничные

условия позволяют постулировать зависимость всех неизвестных переменных от двух пространственных координат: x, z для прямоугольных резервуаров.

Введем безразмерные компоненты u_x^* и u_z^* вектора скорости \vec{u} , давление p , время t^* и независимые переменные x^*, z^* [4]:

$$x^* = \frac{x}{\delta}, z^* = \frac{z}{\delta}, t^* = \frac{3G}{4\rho b\delta^2}t, u_x^* = \frac{4\rho b\delta v_x}{3G}, u_z^* = \frac{4\rho b\delta v_z}{3G}, p = \frac{16\rho b^2\delta^2 P}{9G^2},$$

где v_x, v_z – компоненты вектора скорости \vec{v} ; P – давление; t – время; δ – ширина насадки; b – длина коллектора.

Подставив вновь введенные величины в уравнения сохранения энергии, движения и неразрывности получим:

$$\frac{\partial u_x^*}{\partial t^*} + u_x^* \frac{\partial u_x^*}{\partial x^*} + u_z^* \frac{\partial u_x^*}{\partial z^*} = -\frac{\partial p}{\partial x^*} + \frac{4\mu b}{3G} \left[\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right],$$

$$\frac{\partial u_z^*}{\partial t^*} + u_x^* \frac{\partial u_z^*}{\partial x^*} + u_z^* \frac{\partial u_z^*}{\partial z^*} = -\frac{16\rho^2\delta^3 g_z^*}{9G^2} - \frac{\partial p}{\partial z^*} + \frac{4\mu b}{3G} \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right],$$

$$\frac{\partial u_x^*}{\partial x^*} + \frac{\partial u_z^*}{\partial z^*} = 0,$$

где g_x, g_z – компоненты вектора ускорения свободного падения,

Математическая формулировка граничных условий может быть записана в следующем виде. На всех границах, предполагающих теплообмен с окружающей средой, за исключением границ, на которых поток мазута входит в резервуар и выходит из него, задаются температурные граничные условия третьего рода. На входе жидкости в резервуар считаем заданной её температуру как функцию времени; на выходе из резервуара считаем температуру мазута не меняющейся вдоль основного направления движения. В качестве тепловых начальных условий считаем заданным начальное распределение температур в резервуаре. Гидродинамические граничные условия: примем, что на всех границах, за исключением тех, на которых поток мазута входит в резервуар и выходит из него, жидкость прилипает к стенкам резервуара. На входе в резервуар считаем заданным профиль вектора скорости, который на выходе из форсунки определялся следующими соотношениями:

$$v_x = \left(\left(\frac{z}{\cos\beta} \right)^2 - 1 \right) \cos\beta, v_z = \left(\left(\frac{z}{\cos\beta} \right)^2 - 1 \right) \sin\beta.$$

На выходе из резервуара считаем поле скоростей не меняющимся вдоль основного направления движения. В качестве гидродинамических начальных условий считаем, что в начале процесса разогрева жидкость в резервуаре находится в состоянии движения.

Решение систем нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных производилось с использованием метода Галёркина и метода конечных элементов [5]. Записав систему уравнений движения, неразрывности и переноса энергии в слабой форме с использованием метода Фаэдо–Галеркина, получим систему нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений относительно неизвестных

функций в узлах. Для её решения используются стандартные методы, такие как метод Рунге-Кутты. Для решения систем нелинейных алгебраических уравнений, полученных в ходе применения метода Рунге-Кутты или при решении стационарных задач, используется линеаризация систем нелинейных уравнений при помощи метода простой итерации, для сходимости которого необходимо подбирать как можно лучшее начальное приближение. Так, при нарушении сходимости итераций с нулевым начальным приближением для системы уравнений Навье-Стокса, следует в качестве начального приближения использовать решение, полученное на более грубом разбиении исследуемой области, или решение, полученное при меньших числах Рейнольдса.

При численных исследованиях рассматривался прямоугольный резервуар со следующими размерами $24 \times 80 \times 5$. В качестве модельной жидкости при численных исследованиях рассматривался наиболее часто применяющийся на тепловых электрических станциях и крупных котельных топочный мазут марки М100, используемый в качестве основного или резервного вида топлива. Расход мазута $G = 33,33 \text{ кг/с}$, что соответствует использованию подогревателя марки ПМ-10-120. В начальный момент времени температура мазута $T_0 = 293\text{K}$. Начиная с нулевого момента времени, температура мазута возрастает до значения $T_1 = 353\text{K}$. При расчетах принято следующее значение $\alpha = 0,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$. В моменты времени $0 \leq t^* \leq 10$ происходит линейное изменение температуры мазута на входе в резервуар, моделируемое следующей функцией: $\theta = \theta_0 + (\theta_1 - \theta_0) \frac{t^*}{10}$. В моменты времени

$10 \leq t^* \leq 30$ температура мазута θ на входе в резервуар постоянна и равна 1. В середине по длине резервуара находится линия подачи разогретого мазута, состоящая из двух групп форсунок, угол наклона которых можно изменять по отношению к вертикальной оси $0z$. При численных исследованиях принимались следующие значения углов наклона $\beta = 0^\circ; 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ; 90^\circ$.

На рис.1 представлены распределения линий тока при угле наклона $\beta = 90^\circ$, т.е. когда форсунка расположена перпендикулярно вертикальной оси резервуара. Из рисунка видно, что начиная с самых ранних моментов времени (начиная с $t^* = 5$) в области, примыкающей к вертикальной оси $0z$, возникают вихри (рис.1 а). Объясняется это тем, что в силу разных значений вязкости у поступающего потока нагретого мазута и находящегося в резервуаре более «холодного» мазута возникает обратное течение. С течением времени эта область увеличивается, развиваясь в горизонтальном направлении по оси $0x$ (рис.1 в). По мере прогрева мазута эта область начинает заметно сужаться (рис. 1 г). Данное поведение среды объясняется как различным пространственным расположением по отношению к оси $0x$ мест входа и выхода в резервуар потока, так и степенью прогрева мазута по всей глубине резервуара. В ранние моменты времени (рис.2 а), когда $\theta < 1$, теплоперенос происходит в основном за вынужденной конвекции. Впоследствии, по мере прогрева струи мазута и продвижения ядра теплового потока с температурой $\theta = 1$ к месту выхода из резервуара, все большие слои мазута начинают прогреваться как за счет вынужденного теплопереноса, так и за счет свободной конвекции. Но так как ядро теплового потока с температурой $\theta = 1$ достаточно компактно и находится в основном потоке, то на периферии струи и развивается зона возвратных течений. По мере прогрева мазута за счет свободной конвекции (рис.2 г) возмущения затухают и зона обратных течений становится меньше с одновременным смещением к дну резервуара.

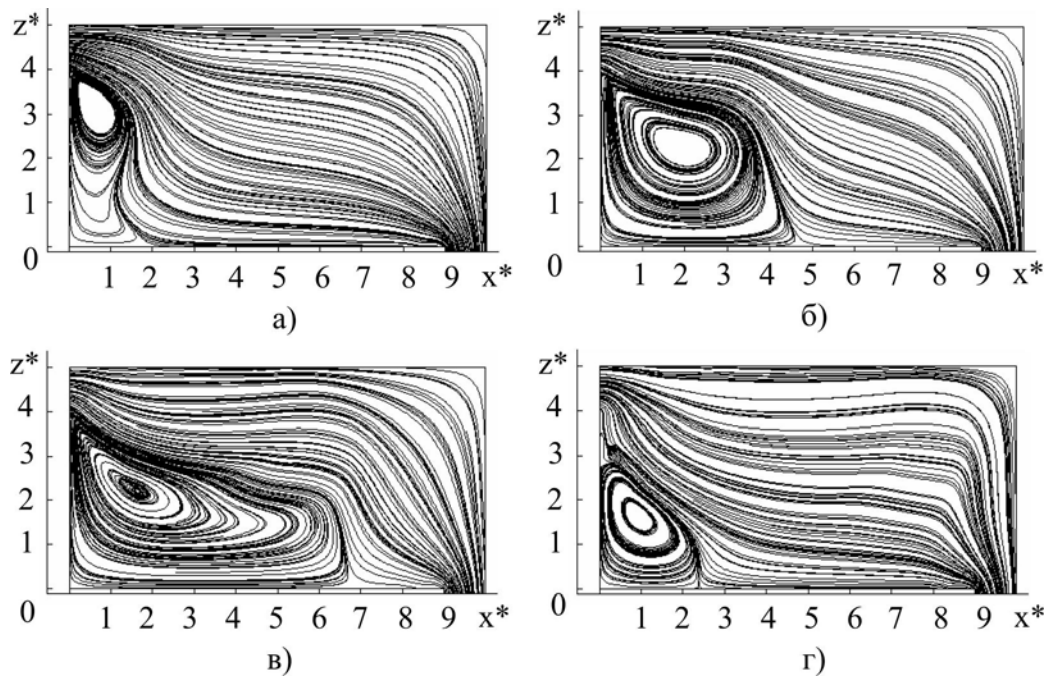


Рис. 1. Изолинии тока при угле наклона сопла насадки $\beta = 90^\circ$.

а) $t = 5$; б) $t = 10$; в) $t = 20$; г) $t = 30$.

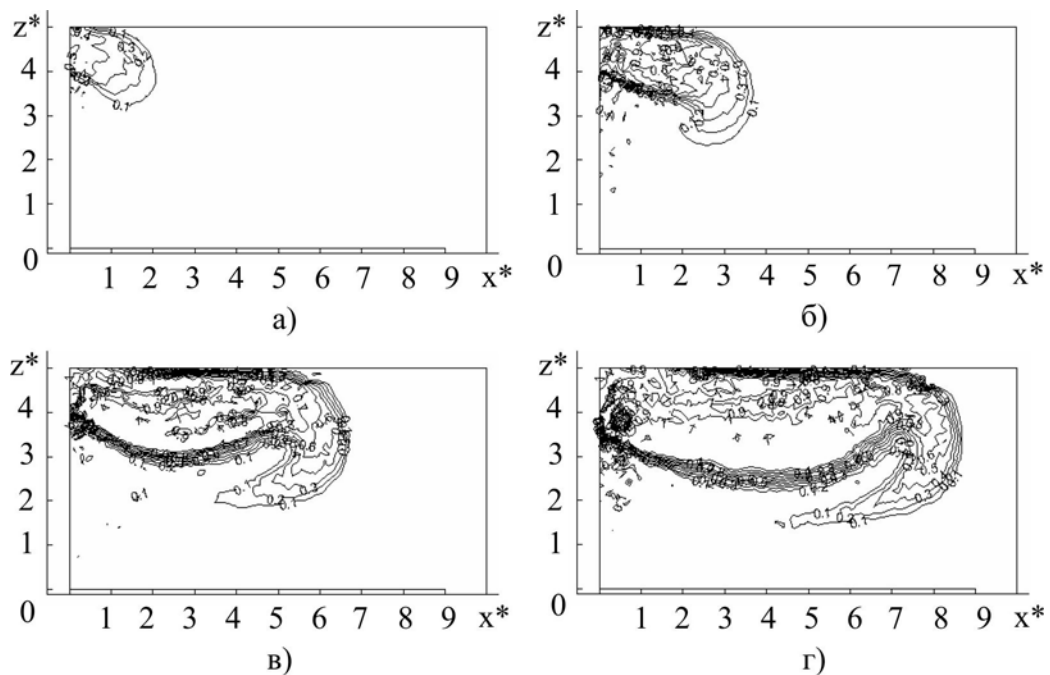


Рис. 2. Изотермы при угле наклона сопла насадки $\beta = 90^\circ$. Обозначения как на рис.1.

При изменении угла наклона форсунки β до 60° (рис. 3) поведение гидродинамических характеристик потока меняется по сравнению с предыдущим случаем (рис.1). Зона обратных течений возникает только в момент нагрева потока мазута, поступающего в резервуар (т.е. при $t^* \leq 10$). При мере развития течения эта область практически исчезает. Об этом же свидетельствует и характер распределения полей температур (рис.4), из которого видно, что уже при $t^* = 30$ фронт теплового потока приближается к

дну резервуара. Необходимо отметить, что характер его распространения аналогичен предыдущему варианту (рис.2).

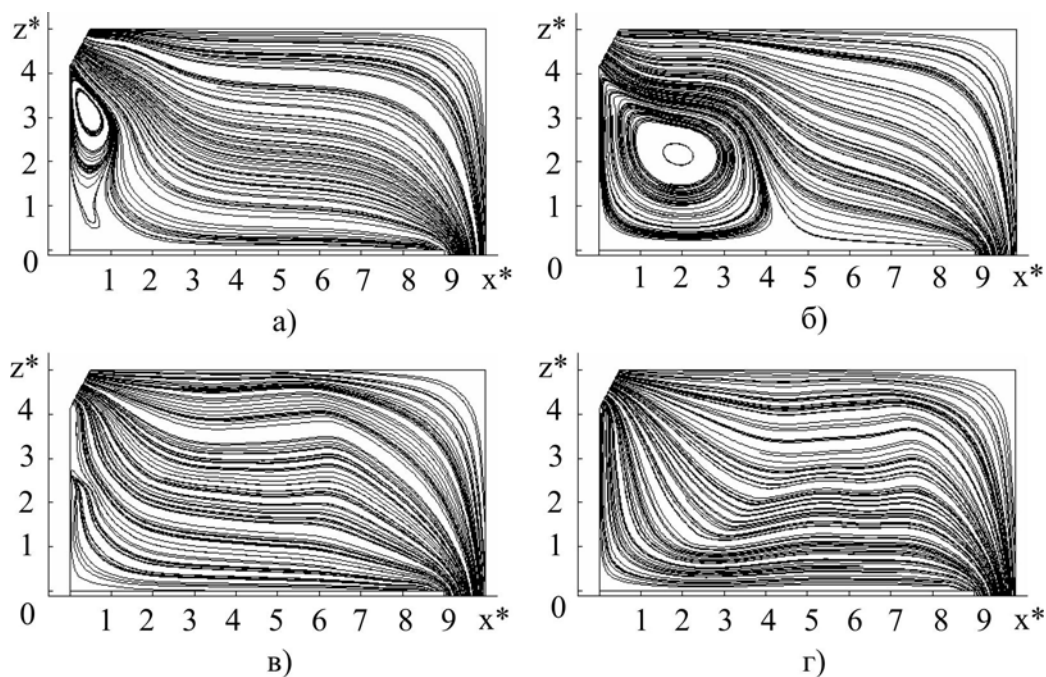


Рис. 3. Изолинии тока при угле наклона сопла насадки $\beta = 60^\circ$. Обозначения как на рис.1.

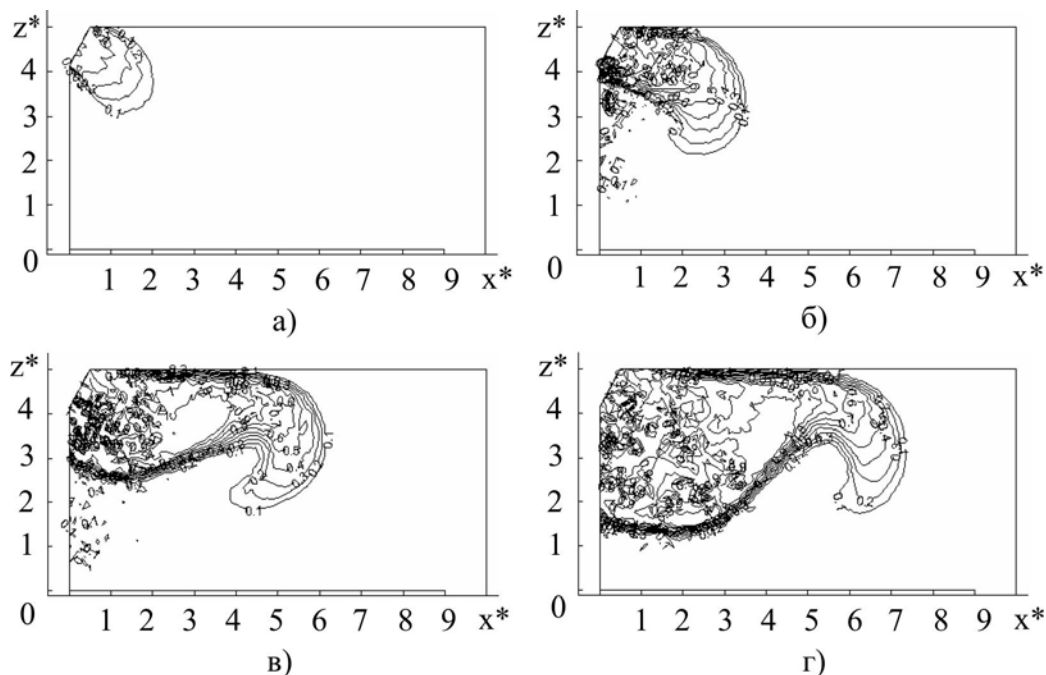


Рис. 4. Изотермы при угле наклона сопла насадки $\beta = 60^\circ$. Обозначения как на рис.1.

При более острых углах наклона форсунки (начиная с $\beta = 45^\circ$) характер распределения как температурных, так и гидродинамических характеристик потока существенно меняется.

Из рис. 5 видно, что уже в начальные моменты времени (рис.5 б) возникает две зоны обратного течения, причем они располагаются как снизу, так сверху по отношению к

области основного течения разогретого мазута. При сравнении линий тока с изотермами (рис. 6) наглядно видно, что объясняется это теми же самыми причинами. Только в отличие от предыдущих случаев, при данном угле наклона ощутимо заметно влияния массовых сил на характер происходящих процессов теплопереноса. Если нижняя зона обратных течений со временем исчезает (при $t^* = 30$), что объясняется прогревом всей толщи мазута, находящего ниже основного потока, то для верхней области это наступает далеко не сразу. О влиянии массовых сил свидетельствует и поведение изотерм.

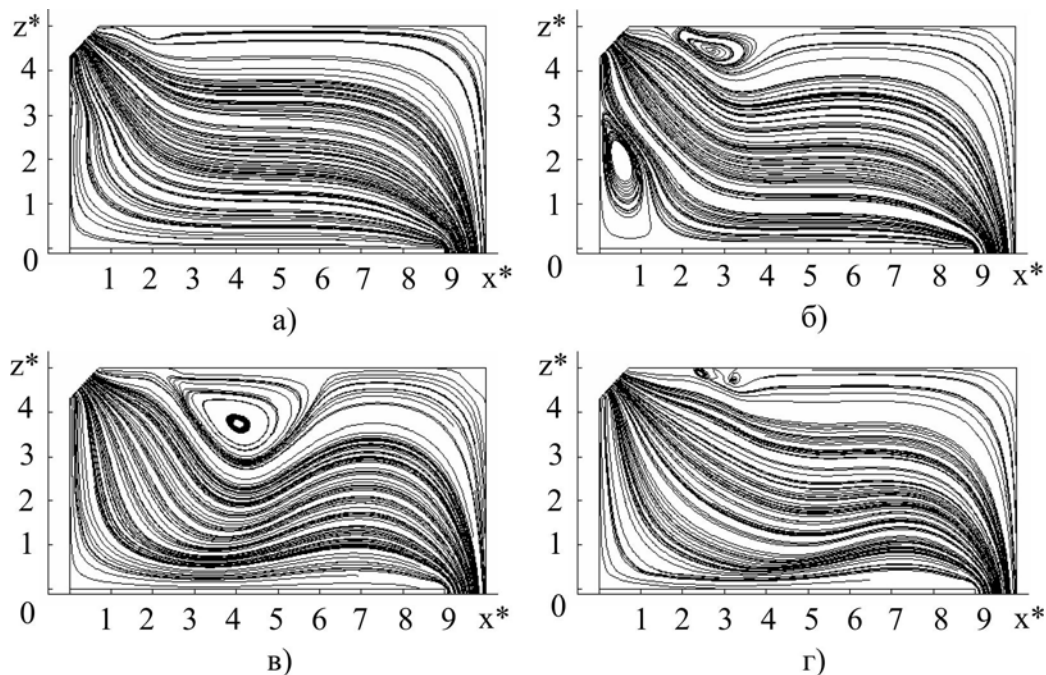


Рис. 5. Изолинии тока при угле наклона сопла насадки $\beta = 45^\circ$. Обозначения как на рис.1.

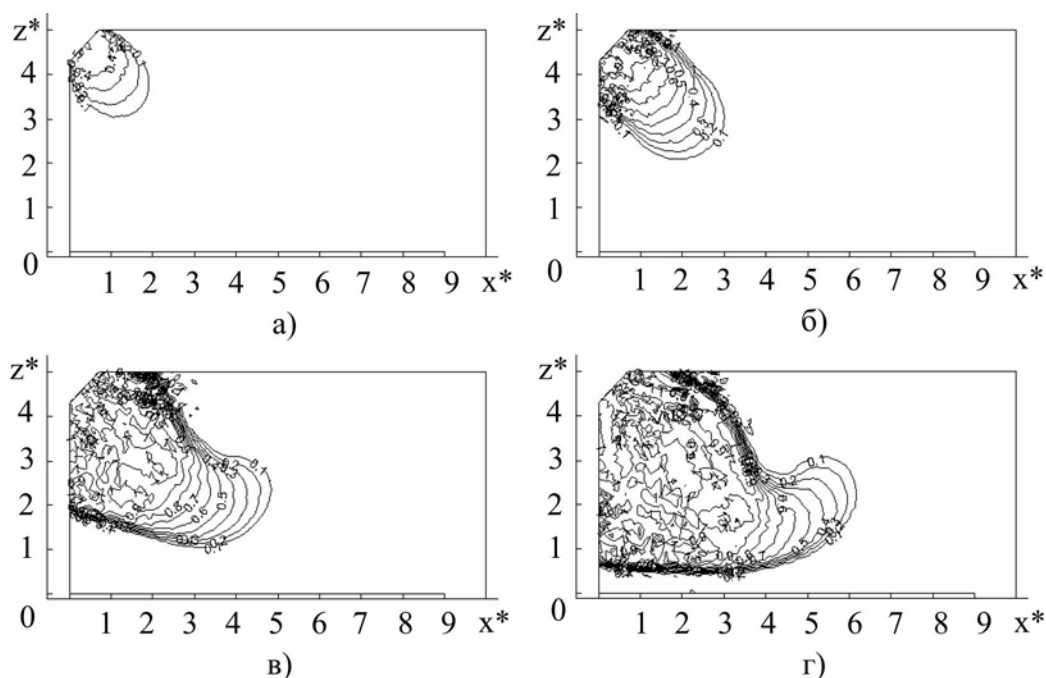


Рис. 6. Изотермы при угле наклона сопла насадки $\beta = 45^\circ$. Обозначения как на рис.1.

При большем увеличении угла наклона в нижней области, по отношению к основному направлению движения струи, зона возвратных течений уже не наблюдается (рис.7), а все возмущения концентрируются наверху. Распространение ядра теплового потока по оси $0x$ происходит более интенсивно в области близкой к нижней границе, что объясняется отражением от дна резервуара струи нагретого мазута (рис.8 г). При этом ядро максимальных значений θ находится около вертикальной оси резервуара.

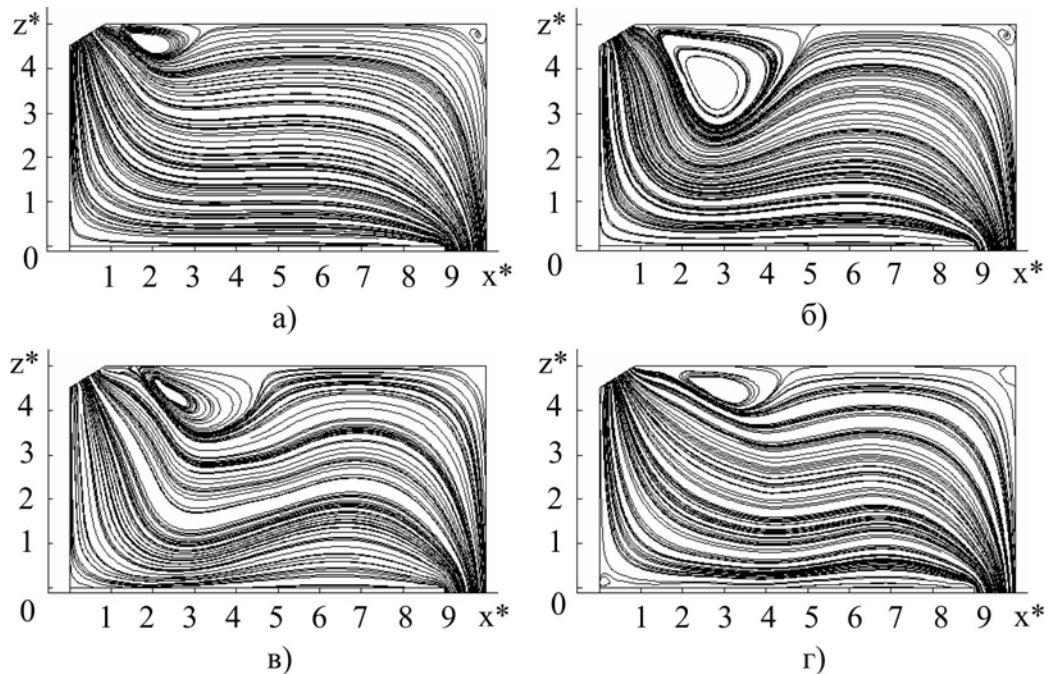


Рис. 7. Изолинии тока при угле наклона сопла насадки $\beta = 30^\circ$. Обозначения как на рис.1.

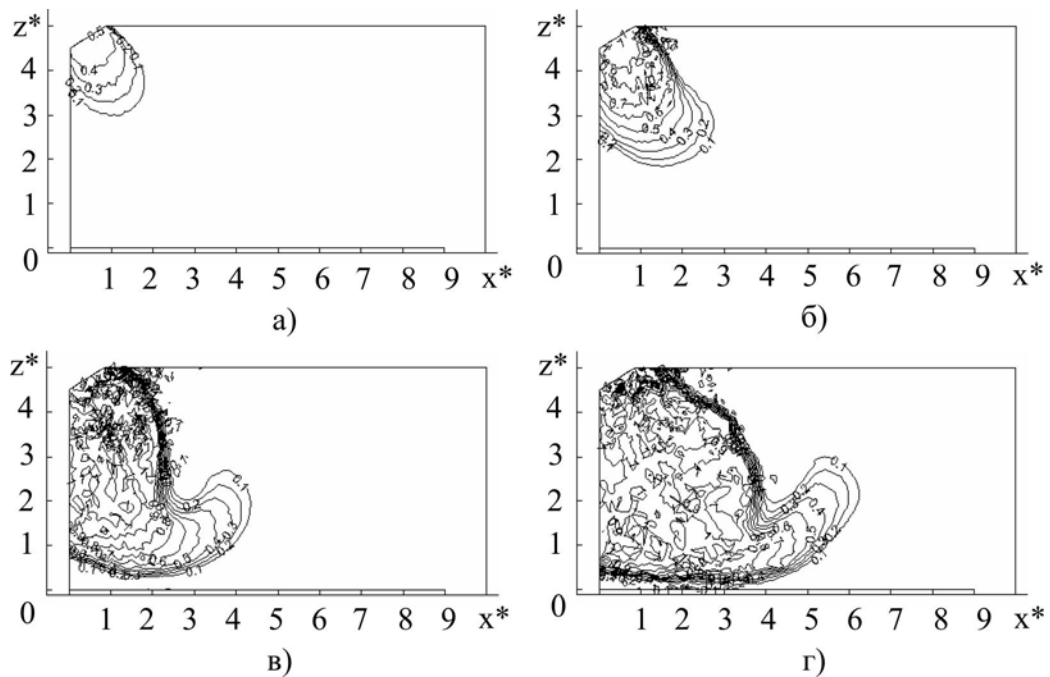


Рис. 8. Изотермы при угле наклона сопла насадки $\beta = 30^\circ$. Обозначения как на рис.1.

В случае, когда форсунка направлена вдоль вертикальной оси резервуара (т.е. $\beta = 0^\circ$) зона возмущения с течением времени все больше увеличивается (рис. 9), при этом происходит ее поджатие к верхней границе (рис. 9 г). В силу того, что кинетическая энергия потока не расходуется на сопротивление горизонтальных слоев холодного мазута, ядро теплового потока с $\theta = 1$ достигает дна резервуара уже при $t^* = 20$ (рис. 10).

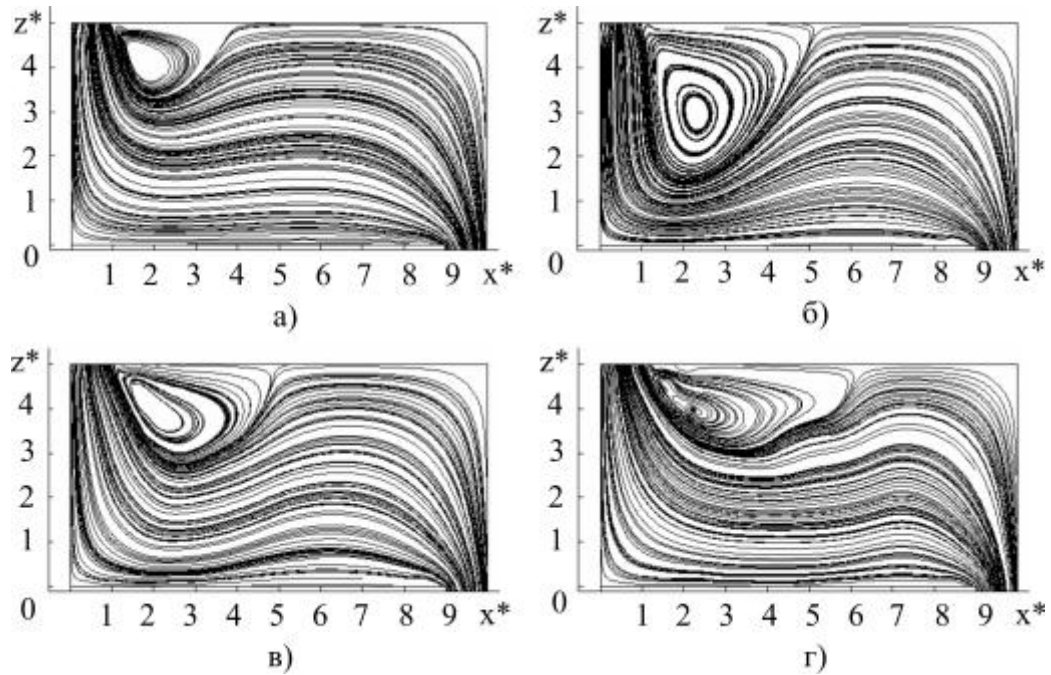


Рис. 9. Изолинии тока при угле наклона сопла насадки $\beta = 0^\circ$. Обозначения как на рис.1.

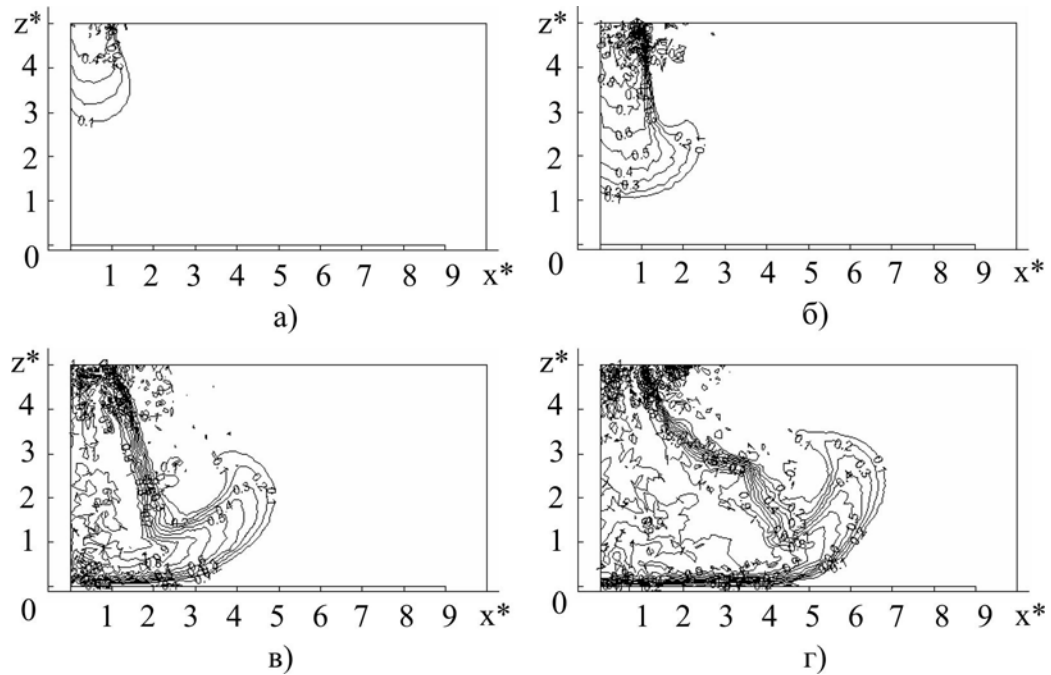


Рис. 10. Изотермы при угле наклона сопла насадки $\beta = 0^\circ$. Обозначения как на рис.1.

В результате численных исследований получены распределения температурных и гидродинамических характеристик ламинарного потока свободных затопленных струй мазута марки М100 при течении в ограниченном объеме, также заполненном данной средой. Исследовались влияние угла подачи потока разогретой жидкости, выходящей из насадок, на гидродинамическую структуру течения и теплообмен при различных теплогидравлических режимах работы теплообменного оборудования. Проведен анализ динамики изменения линий тока, полей скоростей и температуры при циркуляционном подогреве мазута в прямоугольном резервуаре в зависимости от безразмерного значения времени при линейном росте температуры жидкости, поступающей в резервуар и постоянном её расходе. Для каждого частного рассматриваемого случая сделаны соответствующие выводы о влиянии угла подачи разогретой жидкости на процессы теплообмена. Полученные результаты позволяют на практике, в каждом конкретном случае, выбирать наиболее целесообразные с точки зрения теплогидравлической эффективности режимы работы теплообменного оборудования.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФАНИ (госконтракт № 02.516.11.6025, грант президента РФ №НШ-738.2008.8) и РФФИ (грант № 05-08-65508).

Литература

- [1] Шлихтинг Т. Теория пограничного слоя: пер. с нем, Изд-во иностр. лит., Москва, 1972.
- [2] Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа, Наука, Москва, 1987.
- [3] Назмеев Ю.Г., Шамсутдинов Э.В. Теплоперенос при линейном изменении температуры ламинарного потока затопленной стесненной струи вязкой жидкости. Вестник МЭИ. 2006, №5, С.135-140.
- [4] Назмеев Ю.Г., Шамсутдинов Э.В. Численное исследование нестационарного теплообмена в затопленной стесненной струе вязкой жидкости при различных гидродинамических режимах. Известия РАН. Энергетика. 2006, №6, С.92-100.
- [5] Назмеев Ю.Г., Шамсутдинов Э.В. Исследование нестационарного теплопереноса в затопленной стесненной струе вязкой жидкости при скачкообразном изменении ее температуры. Вестник МЭИ. 2006, №4, С.20-26.