

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА СИСТЕМ БЫСТРОГО ОХЛАЖДЕНИЯ И ПОЛУЧЕНИЯ ШУГООБРАЗНОГО СОСТОЯНИЯ ЖИДКОСТИ

Рассмотрен рабочий процесс неомнофазных струйных аппаратов для охлаждения и получения шугообразного состояния жидкости, подходы к его математическому моделированию, приведены результаты теоретического и экспериментального исследования. Разработаны методы расчета межфазного теплообмена, использованы для исследования процессов замораживания ягод и производства «жидкого льда».

Ключевые слова: струйный аппарат, фазовые переходы, охлаждение, замораживание, шугообразное состояние.

Розглянуто робочий процес неомнофазних струменевих апаратів для охолодження і отримання шугоподібного стану рідини, підходи до його математичного моделювання, приведені результати теоретичного і експериментального дослідження. Розроблені методи розрахунку міжфазного теплообміну, використані для дослідження процесів заморожування ягід і виробництва «рідкої криги».

Ключові слова: струменевий апарат, фазові переходи, охолодження, заморожування, шугоподібний стан.

The working process of unmonophase stream vehicles is considered for cooling and receipt of the lardsimi lars state of liquid, going near its mathematical design, the results of theoretical and experimental research are resulted. The methods of calculation of interphases heat-massesexchanger are developed and are used for research of processes of freezing of berries and production of «liquid ice».

Keywords: stream vehicle, phase transitions, cooling, freezing, lardsimilars state.

Струйный аппарат, фазовые переходы, охлаждение, замораживание, шугообразное состояние.

Постановка задачи. Задачи охлаждения и кристаллизации жидкости или насыщенных ею структур имеют широкое распространение в аэрокосмической и холодильной технике, пищевой и перерабатывающей промышленности, представляют интерес при осушении водонасыщенных шламов, при разделении многокомпонентных смесей и в других областях. Интенсификация указанных процессов позволяет уменьшить габариты и массу теплообменников, время процесса. В технике криогенных топлив малые габариты и масса охлаждающих устройств в ряде случаев определяют саму возможность их использования. Малое время охлаждения

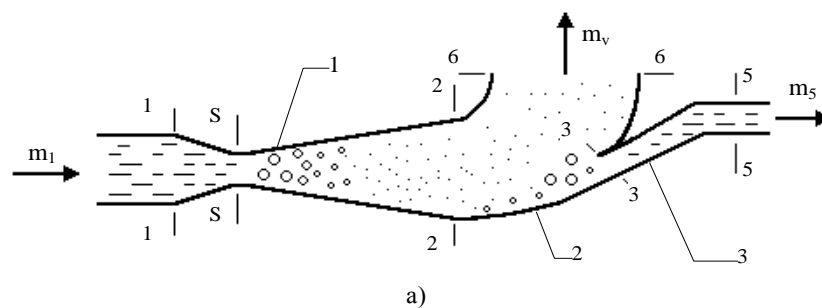
позволяет значительно повысить качество продукта при высокотемпературной термообработке молока и других пищевых растворов.

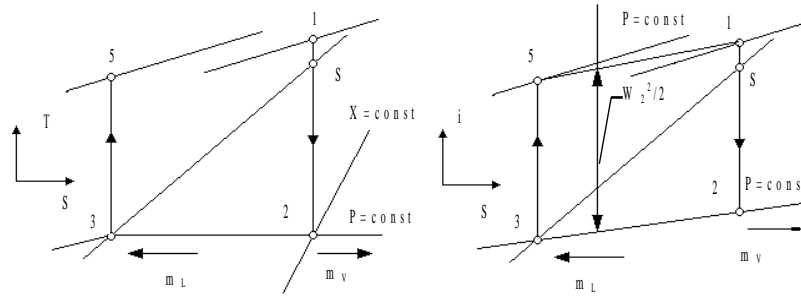
Основное содержание. Интенсификация теплообмена в поверхностных теплообменниках сопряжена с ростом гидравлических потерь. В то же время отвод теплоты принципиально позволяет повысить полное давление охлаждаемой жидкости. Но для преобразования теплоты в работу обязательно присутствие термодинамического рабочего тела, т. е. сжимаемой среды. Кроме того, необходимо реализовать процесс расширения с передачей работы от этой среды к охлаждаемой жидкости. Использование традиционных систем типа детандер-насос здесь бесперспективно ввиду их сложности.

Поэтому значительный интерес представляют неоднородные струйные аппараты [1], где охлаждаемая жидкость и образующийся за счёт её частичного испарения пар расширяются при непосредственном контакте и развитой межфазной поверхности. Высокие значения коэффициента теплоотдачи в сочетании с большой площадью теплообмена обеспечивают скорость охлаждения жидкости до 600 К/с. Причём с ростом уровня температуры увеличивается и плотность пара, что позволяет сделать устройства более компактными. Рост величины охлаждения жидкости увеличивает долю пара и, следовательно, располагаемую работу, которая идёт на увеличение полного давления жидкости. Использование струйных охладителей жидкости (СОЖ) принципиально возможно во всех выпарных установках и системах, где жидкость можно охлаждать за счёт частичного испарения в адиабатных условиях.

К таковым относятся, прежде всего, криогенные комплексы различного назначения. Здесь для охлаждения и получения шугообразного состояния жидкости широкое распространение нашёл метод вакуумирования парового пространства емкости [2]. Однако в этом случае полное давление жидкости снижается до давления насыщения, возможно температурное расслоение жидкости по высоте емкости, попадание в нее атмосферного воздуха. При использовании поверхностных теплообменников, где в качестве холодного теплоносителя чаще всего выступает часть основного потока, дросселируемого до двухфазного состояния, эти недостатки устраняются. Но из-за малых реализуемых температурных напоров очень велика масса конструкции, что приводит к значительным потерям жидкости на захлаживание. В обоих методах не используется располагаемая работа пара, нельзя получить шугообразное состояние жидкости с мелкодисперсной кристаллической фазой.

Струйный охладитель жидкости в значительной мере устраняет отмеченные недостатки традиционных методов. Идеализированный рабочий процесс устройства и номера характерных сечений приведены на рис. 1. В геометрическом сопле 1 происходит изоэнтропное расширение потока от давления P_1 на входе до давления P_2 на его срезе. Последнее соответствует давлению насыщения для заданной температуры охлажденной жидкости и обеспечивает двухфазное, а при получении шуги трехфазное состояние в сечении 2. Точка «S» соответствует началу парообразования в потоке вскипающей жидкости. Парожидкостный поток на срезе сопла имеет более низкую, чем на входе, температуру и обладает кинетической энергией $W_2^2/2$. При этом скорость W_2 больше той, которая реализуется при расширении жидкости без вскипания.



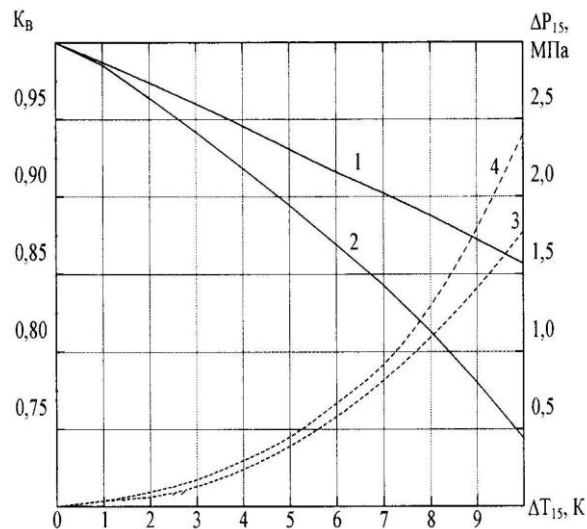


б)

Рис. 1. Идеализированный рабочий процесс СОЖ

- а) схема СОЖ: 1 – сопло; 2 – поверхностный сепаратор; 3 – диффузор;
- б) идеализированный рабочий процесс СОЖ в T, S – и i, S – координатах.

В сепараторе 2 поток без изменения кинетической энергии разделяется на фазы. Паровая фаза отводится через сечение 6, а охлажденная жидкость восстанавливает свое давление в диффузоре 3. За счет работы, совершаемой паром при совместном расширении в сопле, полное давления P_5 охлажденной жидкости на выходе СОЖ в идеализированном процессе всегда больше давления P_1 на входе (см. рис.1). Доля образующегося в сопле пара тем выше, чем больше требуемая величина захлаживания жидкости $\Delta T_{15} = T_1 - T_5$. Поэтому с ростом ΔT_{15} увеличивается и величина ΔP_{15} приращения полного давления жидкости в СОЖ (рис. 2). Там же приведена зависимость от величины захлаживания доли $K_B = m_5/m_1$ охлажденного водорода.



**Рис. 2. Зависимость прироста полного давления ΔP_{15} и доли $K_B = m_5/m_1$ охлажденного водорода от величины захлаживания жидкости ΔT_{15} .
 $P_1 = 0,6$ МПа; 1, 2 – K_B ; 3, 4 – ΔP_{15} ; 1, 4 – $P_2 = 0,008$ МПа; 2, 3 – $P_2 = 0,1$ МПа;**

В режиме переохлаждения, когда давление на срезе сопла ниже атмосферного, доля охлажденного водорода K_B значительно выше, чем в случае охлаждения, так как с уменьшением давления теплоемкость жидкого водорода существенно понижается, а скрытая теплота парообразования практически не меняется. Для жидких кислорода, азота и метана потери жидкости на испарение практически одинаковы как для охлаждения, так и для переохлаждения. При охлаждении на 5 К до состояния насыщения при атмосферном давлении необходимо испарить 3,2 % метана, 4,5 % азота, 3,7 % кислорода, 10,5 % водорода и менее 1% воды. Водородную шугу с массовой долей кристаллов 50% можно получить, испарив 6,4% жидкости, находящейся при параметрах тройной точки. Эти результаты приведены для

идеализированного СОЖ, когда рабочие процессы в его элементах равновесны, а разделение фаз в сепараторе полное.

Действительный рабочий процесс СОЖ значительно сложнее. Необратимые потери в сопле проявляются как вследствие трения потока о стенки, так и из-за термической и скоростной неравновесности фаз. Вклад каждого из этих факторов зависит от рода и чистоты жидкости, режимных параметров СОЖ, длины и угла раскрытия диффузорной части сопла, от формы конфузорной и диффузорной частей. Например, удлинение расширяющейся части приводит к уменьшению потерь из-за термической и скоростной неравновесности фаз, но увеличивает потери на трение о стенки сопла.

Расчёты сопла выполнены на основе одномерной нестационарной модели течения вскипающего потока в канале заданной геометрии [3, 4]. Она базируется на фундаментальных положениях механики гетерогенных сред [5], учитывает описанные эффекты и дает удовлетворительное согласование расчетных и опытных данных по расходу через сопло и параметрам фаз на его срезе. Пример расчета истечения вскипающего водорода с расходом около 0,6 кг/с приведен на рис. 3. Здесь представлены объемное паросодержание α ; скорость пара W_v ; скорость жидкой фазы W_L ; температура жидкой фазы T_L ; температура пара T_v ; статическое давление P и площадь поперечного сечения f плоского сопла Лавала.

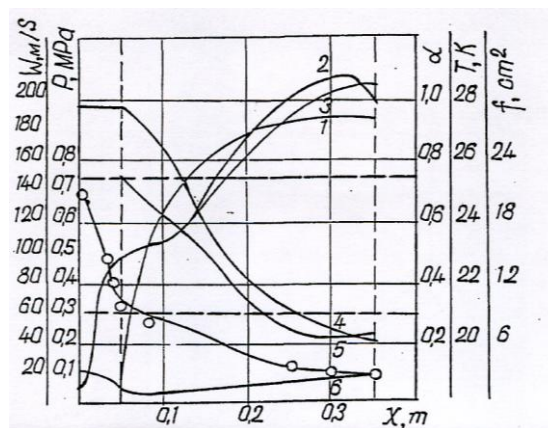


Рис. 3. Параметры потока вскипающего водорода по длине сопла:
 $P_1 = 0,684$ МПа; $T_1 = 28,4$ К; $P_2 = 0,1$ МПа; 1 – α ; 2 – W_v ; 3 – W_L ; 4 – T_L ;
 5 – T_v ; 6 – P ; • – экспериментальное значение статического давления

Максимальный перегрев жидкости реализуется вблизи горла сопла. На срезе при рассматриваемых условиях разности скоростей и температур фаз незначительны, диаметр каплей водорода составляет около 30 мкм. Для кислорода, азота и метана неравновесность по скоростям и температурам фаз, а также диаметр каплей больше. С точки зрения влияния на эффективность СОЖ диссипативные эффекты в соплах проявляются в уменьшении скорости и увеличении температуры жидкости на срезе по сравнению с равновесными их значениями.

Для разделения фаз высокоскоростного парожидкостного потока в СОЖ наиболее приемлем поверхностный сепаратор. Он представляет криволинейную поверхность переменного радиуса, установленную под углом к потоку из сопла. Для сепарации фаз необходимо обеспечить определенный угол поворота потока. Его величина зависит от соотношения плотностей и скоростей фаз, диаметра, концентрации и скорости каплей, высоты сечения среза сопла и профиля сепарирующей поверхности, угла раскрытия канала сепаратора и др. [6].

Скорость жидкости в сепараторе уменьшается как из-за трения о стенки, так и вследствие неупругого удара при осаждении каплей. Взаимодействие каплей с поверхностью сопровождается разбрызгиванием уже осевшей жидкости и внедрением в нее паровых включений [7], отражённые капли и разбрызгиваемая жидкость взаимодействуют с каплями исходного потока [8]. Перегрев жидкости на срезе сопла приводит к ее кипению в

отсепарированном слое, а повышенное давление у криволинейной поверхности – к конденсации паровых включений. В результате структура отсепарированного слоя существенно неоднородна [9]. При надлежащем профиле сепаратора основная масса жидкости течет в достаточно плотном ядре потока, причем вблизи сепарирующей поверхности может существовать слой чистой, т. е. без паровых включений жидкости. Содержание жидкости вне ядра потока асимптотически уменьшается до нуля по мере удаления от сепарирующей поверхности.

В диффузор 3 входит часть отсепарированного слоя, определяемая высотой захватывающей щели в сечении 3 – 3 (рис. 1). С увеличением высоты щели возрастает не только доля жидкости, попадающей в диффузор, но и количество пара, захватываемого с потоком охлажденной жидкости. Последнее ведет к уменьшению полного давления охлажденного потока и росту температуры жидкости, а при получении шуги к уменьшению доли кристаллической фазы из-за конденсации пара. На практике среднее объемное паросодержание ограничивают величиной 0,55...0,65. При этом отсекается и сбрасывается с отводимым паром 2,4 % жидкости, находящейся в периферийной части отсепарированного слоя.

Диссипативные потери и неполное разделение фаз в сепараторе СОЖ приводят, прежде всего, к снижению достижимого давления за диффузором P_5 и доли охлажденной жидкости K_B . Например, при параметрах водорода на рис. 3 полное давление жидкости на срезе сопла составляет 1,6 МПа, а достижимое давление за диффузором 0,7 МПа. При работе СОЖ в контуре превышение последнего приводит к резкому уменьшению расхода охлажденной жидкости через диффузор и срыву в работе контура. Такой характер изменения расхода обусловлен сверхзвуковой (по смеси) скоростью потока на входе в диффузор и наличием скачка уплотнения-конденсации при торможении такого потока [10].

Для экспериментального исследования наряду с традиционными схемами измерения интегральных параметров использовались специально разработанные оригинальные методы и устройства для определения скорости, объёмного содержания и температуры жидкости в высокоскоростном потоке, в том числе при наличии перегрева жидкости [11, 12]. При получении шугообразного состояния потока предложен и отработан способ определения наличия твердой фазы [13].

Описание межфазного теплообмена во всех элементах СОЖ, в том числе для двухкомпонентного потока, выполнено на основе квазиравновесной схемы [5] фазового перехода, когда температура на межфазной поверхности соответствует состоянию насыщения при давлении пара компонента, претерпевающего фазовый переход. Подобный подход используется и при расчете процесса кристаллизации жидкости в капле. При этом для описания изменения средней температуры жидкой капли при нестационарном процессе теплопроводности получены соответствующие аппроксимации, а для кристаллизующейся капли рассмотрено влияние наличия в кристаллической ее части паровых пор [14]. Дальнейшее развитие такой подход получил при моделировании процессов получения «жидкого льда» в объеме вакуумируемого рассола [15] и замораживания ягод в потоке холодного азота [16].

Выполненные исследования СОЖ и разработанные методы его расчёта и профилирования позволили на практике реализовать отмеченные выше преимущества. При стендовых испытаниях криогенных насосов обеспечено охлаждение и повторное использование (рециркуляция) жидких водорода, кислорода и природного газа. В зависимости от режима испытаний и рода компонента расход охлажденной на 2...20 К жидкости составлял 0,62...0,95 от расхода на входе в СОЖ. Это соответствует 91...96 % максимально достижимого расхода в идеализированном процессе.

Для СОЖ с расходом жидкого водорода 0,6 кг/с перегрев охлажденной жидкости относительно температуры насыщения на срезе сопла составил 0,6...1,2 К, давление охлажденной жидкости за диффузором на всех режимах на 0,1...0,4 МПа выше давления насыщения. Масса СОЖ (без теплоизоляции) менее 2 кг. Данный СОЖ обеспечивал рециркуляцию 60...92 % жидкого водорода при стендовых испытаниях центробежного насоса.

Отводимый пар через систему трубопроводов уходил к дожигателю. Расчетные соотношения достаточно точно описывают характеристики СОЖ и контура с рециркуляцией (рис. 4), границы области устойчивой работы этой системы.

При давлении на срезе сопла ниже тройной точки в СОЖ можно получить шугообразное состояние жидкости и регулировать его параметры. Разработанные методы расчета позволяют определить необходимые для этого геометрию и режим работы. Например, для получения шугообразного водорода с размером кристаллов менее 40 мкм давление на входе в СОЖ составляет 0,18 МПа, полное давление потока шуги с концентрацией твердой фазы 50% на выходе 0,12 МПа. При температуре жидкого водорода на входе 21 К для реализации такого процесса необходимо испарить около 24 % жидкости. Возможность получения потока шуги в СОЖ была подтверждена расчётным путём [4] и в эксперименте на азоте с блоком сопло-сепаратор при расходе около 0,1 кг/с.

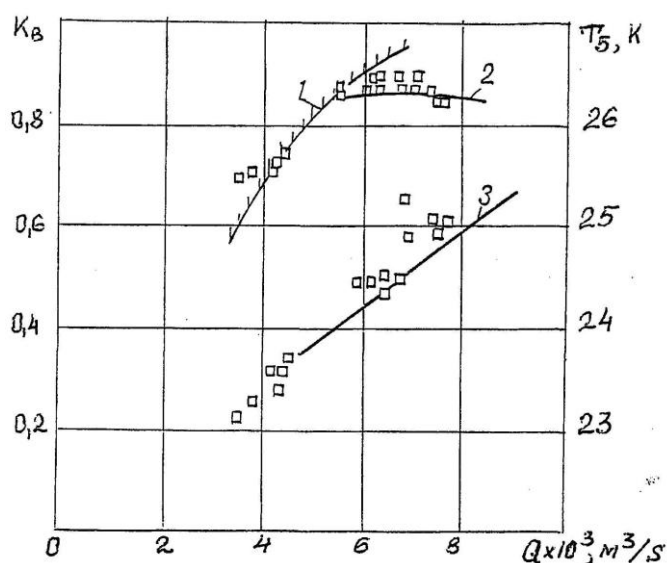


Рис. 4. Характеристики контура рециркуляции водорода.

$n = 500$ об/с. 1 – граница устойчивости насоса; 2 и 3 – доля K_B и температура T_5

Выводы. Полученные результаты свидетельствуют о значительных преимуществах струйных охладителей жидкости по сравнению с традиционными устройствами, когда охлаждение и получение шугообразного состояния жидкости возможно за счет частичного ее испарения. Разработанные методы расчета СОЖ апробированы для различных сред и режимных параметров, при стендовых испытаниях штатных насосных агрегатов, и позволяют надежно прогнозировать характеристики СОЖ, профилировать их проточную часть. Струйные охладители жидкости могут также использоваться при термообработке молока и в вакуум-выпарных установках [17, 18]. Отработанные модели описания межфазного теплообмена вполне пригодны для расчёта процессов испарительного охлаждения и замораживания жидкости и насыщенных ею структур, например, в технологиях жидкого льда и быстрого замораживания ягод и фруктов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дыменко С.К., Петухов И.И., Турнов М.А., Фролов С.Д., Ястремский И.П. О применении струйного паро-жидкостного сепарационного насоса для осуществления рециркуляции криогенных жидкостей // В кн.: Газотермодинамика многофазных потоков в энергоустановках, вып.2. – Харьков, 1979. – С. 31-35.
2. Гетманец В.Ф., Михальченко Р.С., Архипов В.Т. Исследование затвердевания криогенных жидкостей при использовании откачки. – Инженерно-физический журнал, 22, 648-655 (1982).

3. Сырый В.Н., Петухов И.И., Блинков В.Н. Исследования течения вскипающего водорода в соплах Лаваля. – Межвуз. сб. научн. тр. «Газотермодинамические процессы в энергоустановках с многофазным рабочим телом». – Харьков: ХАИ, 1990. – С. 10-15.
4. Петухов И.И., Сырый В.Н. Численное моделирование вскипающих потоков криожидкостей с кристаллизацией капель // Авиационно-космическая техника и технология, 2005, вып. 1 (17). – С. 30-33.
5. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. – М., Наука, 1978.
6. Петухов И.И. Исследование движения жидкости на участке осаждения капель поверхностного сепаратора // Газотермодинамика многофазных потоков в энергоустановках. Вып. 5. – Харьков: ХАИ. – 1982. – С. 86-93.
7. Петухов И.И. Формирование отсепарированного слоя на участке осаждения капель // Газотермодинамика многофазных потоков в энергоустановках, вып. 6. – Харьков: ХАИ, 1984. – С. 50-54.
8. Петухов И.И., Давыдов Ю.Е., Шахов Ю.В. Взаимодействие частиц при сепарации фаз высокоскоростного паро-капельного потока // Газотермодинамические процессы в энергоустановках с многофазным рабочим телом. – Харьков, 1990. – С. 54-58.
9. Петухов И.И., Фролов С.Д., Шашко В.А., Ястремский И.М. Исследование структуры высокоскоростного потока на выходе поверхностного сепаратора // Газотермодинамика многофазных потоков в энергоустановках. Вып. 5. – Харьков: ХАИ. – 1982. – С. 93-98.
10. Петухов И.И., Шахов Ю.В., Сырый В.Н., Давыдов Ю.Е., Косицын И.П. Струйная система утилизации жидкого водорода при испытаниях насоса ГТД // Материалы второго конгресса двигателестроителей Украины с иностранным участием. – К.; Харьков: Рыбачье. – 22-25 сентября 1997. – С. 364-369.
11. Петухов И.И., Фролов С.Д. Об измерении локальных параметров пузырькового газожидкостного потока трубчатыми зондами // Газотермодинамика многофазных потоков в энергоустановках, вып. 3. – Харьков, 1980. – С. 121-126.
12. Петухов И.И., Шашко В.А., Ястремский И.П. Способ измерения температуры криогенной жидкости в парожидкостном потоке // А.с. СССР №1037088, 1983.
13. Петухов И.И., Шахов Ю.В. Способ определения наличия твердой фазы в проточной части струйного охладителя жидкости // А.с. СССР 1689823, 1991.
14. Петухов И.И., Сырый В.Н. Тепломассообмен при кристаллизации капли криогенной жидкости в собственном паре. – Сб. научн. тр. «Многофазные потоки в энергоустановках». – Харьков: ХАИ, 1988. – С. 135-141.
15. Михайленко Т. П., Петухов И.И., Межфазный тепломассообмен в низкотемпературных установках для кристаллизации вакуумируемых растворов // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28. – № 1. – С. 79-83.
16. Петухов И.И., Сырый В.Н., Лисица А.Ю. Исследование процесса замораживания ягод // Холодильная техника и технология – 2008. – № 3 (113). – С. 67-71.
17. Петухов И.И., Шахов Ю.В., Маникин И.Б. Струйные аппараты для пароконтактного нагрева питьевого молока // Авиационно-космическая техника и технология. Сб. трудов ХАИ 1994 года. – Харьков, 1995. – С. 107-109.
18. Петухов И.И., Шахов Ю.В. Применение сепарационного насоса в качестве калоризатора и пароотделителя вакуум-выпарной установки непрерывного действия // Патент РФ №2032347 от 10.04.1995 г.

Рецензенты: д.т.н., профессор Щедролюсєв А.В.,
к.т.н., доцент Щєсюк О.В.

© Петухов И.И., 2009

Стаття надійшла до редколегії 20.05.09